

Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen



Jukka-Pekka Pitkänen



RATAHALLINTOKESKUS
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN

Ratahallintokeskuksen
julkaisuja A 4/2006

Radan välityskyvyn mittamisen ja tunnuslukujen kehittäminen

Jukka-Pekka Pitkänen

Helsinki 2006

Ratahallintokeskus

Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2006

ISBN 952-445-145-x (nid.)

ISBN 952-445-146-8 (pdf)

ISSN 1455-2604

Julkaisu pdf-muodossa: www.rhk.fi

Kannen ulkoasu: Proinno Design Oy, Sodankylä

Kansikuva: RHK:n kuva-arkisto

Helsinki 2006

Pitkänen, Jukka-Pekka: Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen. Ratahallintokeskus, Liikennejärjestelmäosasto. Helsinki 2006. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2006. 146 sivua, 5 liitettä. ISBN 952-445-145-x, ISBN 952-445-146-8 (pdf), ISSN 1455-2604.

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä on tutkittu ja esitelty erilaisia menetelmiä ratakapasiteetin ja sen käyttöasteen mittaamiseksi. Työn tavoitteena on ollut löytää mahdollisimman helppokäyttöinen ja luotettava menetelmä ratakapasiteetin arviointiin. Lisäksi työn tavoitteena on ollut selvittää vuoden 2005 alussa käyttöön otetun uuden junien kulun seurantarjestelmästä (JUSE) saatavien myöhästymistilastojen käyttömahdollisuus kapasiteettitarkasteluissa.

Luotettavan menetelmän löytämistä vaikeuttaa se, että ratakapasiteetti on suhteellinen käsite ja kapasiteetin suuruus on riippuvainen muun muassa infrastruktuurin ja kaluston ominaisuuksista. Ratakapasiteettiin suuruuteen vaikuttavat radalla liikennöitävien junien ajonopeus ja muut ominaisuudet, ratageometria sekä käytettävien turvalaite- ja junan kulun valvontajärjestelmän (JKV) ominaisuudet.

Ratakapasiteetti on myös riippuvainen käytettävästä aikataulurakenteesta. Samankaltaisten ja samaan suuntaan ajavien junien ryhmittely lisää vapaana olevan kapasiteetin määrää. Kapasiteetin kannalta optimaalisen aikataulurakenteen laatiminen on kuitenkin usein mahdotonta eri toimijoiden ristiriitaisten tarpeiden takia.

Työssä esitellyistä laskentamenetelmistä on valittu neljä tapaustutkimuksiin, joissa valittuja menetelmiä on sovellettu yksiraiteisten rataosien Seinäjoki–Oulu ja Luumäki–Imatra kapasiteetin laskemiseen. Tarkasteltavia kohteita yhdistävät molempien rataosien suuret junamäärät ja liikennemäärän kasvusta aiheutuva lisärakentamisen paine.

Tapaustutkimuksissa eri kapasiteetin laskentamenetelmillä saadut tulokset rataosien kapasiteeteista vaihtelivat paljon. Menetelmien luotettavuutta ja tulosten tarkkuustasoa voidaan jatkossa parantaa lisäämällä malliin Suomen olosuhteisiin kalibroituja korjauskertoimia ja lisätermejä.

Kapasiteetin laskentamenetelmien lisäksi tapaustutkimuskohteille laskettiin huipputunnin kapasiteetin käyttöasteet kansainvälisen rautatieliiton vuonna 2004 käyttöön otetulla UIC 406 -menetelmällä. UIC 406 -menetelmä on otettu laajalti käyttöön Euroopassa ja menetelmän käyttökokemukset ovat olleet erittäin positiivisia. Tässä työssä UIC 406 -menetelmää on sovellettu tapaustutkimuskohteisiin vuorokauden kahden vilkkaimman tunnin osalta. Tutkimus ositti, että menetelmän avulla rataosan kapasiteetin käyttöasteen laskeminen on yksinkertaista, ja menetelmällä saadut tulokset ovat aikaisempien tutkimustulosten perusteella suhteellisen luotettavia. Menetelmän ongelma on kuitenkin sen vaatimien lähtötietojen määrä ja niiltä vaadittava tarkkuustaso. Parhaiten UIC 406 -menetelmä soveltuu kahden tai useamman, esimerkiksi nykyisen ja suunnitteella olevan, aikatauluvaihtoehdon vertailuun.

Tämän työn yhteydessä tehdyt analyysit JUSEsta saataville myöhästymistilastoille osoittivat, että kirjattujen myöhästymistapausten avulla on mahdollista analysoida rataosan kapasiteettia myös Suomessa. Tässä työssä saadut tulokset olivat vähäisestä havaintomäärästä huolimatta lupaavia ja osoittivat, että myöhästymistilastoja kannattaa käyttää hyväksi kapasiteettitarkasteluissa myös jatkossa.

Pitkänen Jukka-Pekka: Mätning av banans kapacitet och utveckling av nyckeltal. Banförvaltningscentralen, Trafiksystemavdelningen. Helsingfors 2006. Banförvaltningscentralens publikationer A 4/2006. 146 sidor och 5 bilagor. ISBN 952-445-145-x, ISBN 952-445-146-8 (pdf), ISSN 1455-2604.

SAMMANDRAG

I detta arbete har olika metoder undersökts och presenterats för att mäta bankapacitet och kapacitetsutnyttjande. Målet med arbetet har varit att ta fram en metod som är lätt att använda och så tillförlitlig som möjligt för att bedöma bankapacitet. Målet har dessutom varit att utreda möjligheten att i kapacitetsgranskningarna använda statistiker från det nya systemet för uppföljning av tågens punktlighet (JUSE), som togs i bruk i början av år 2005.

Bankapacitet är ett relativt begrepp och kapaciteten beror bl.a. på infrastrukturen och det rullande materielets egenskaper, vilket gör det svårare att hitta en tillförlitlig metod. Tågens hastighet och deras övriga egenskaper, bangeometrin samt säkerhets-anordningarnas och de automatiska tågkontrollsystemens (ATC) egenskaper inverkar på banans kapacitet.

Bankapaciteten beror också på tidtabellsstrukturen. Grupperingen av liknande tåg och tåg som kör i samma riktning ger större kapacitet. Beroende på aktörernas olika behov är det dock oftast omöjligt att upprätta en optimal tidtabellsstruktur med hänsyn till kapaciteten.

Av de kalkylmetoder som har presenterats i arbetet har fyra valts för fallstudier. De valda metoderna har tillämpats vid kapacitetsberäkningen på de enkelspåriga banavsnitten Seinäjoki-Uleåborg och Luumäki-Imatra. Gemensamt för de granskade banavsnitten är det stora antalet tåg och trycket på att bygga ut banan, på grund av ökande trafik.

I resultaten från fallstudierna om banavsnittens kapacitet, som har beräknats med olika kalkylmetoder, förekom stora variationer. Metodernas tillförlitlighet och resultatens noggrannhetsnivå kan i fortsättningen förbättras genom att komplettera modellen med kalibrerade korrigeringskoefficienter och med tilläggstermer för finska förhållanden.

Förutom med kalkylmetoderna för kapacitetsberäkning beräknades kapacitetsutnyttjandet vid fallstudieobjekten under trafikens maximitimme med Internationella Järnvägsunionens UIC 406-metod, som togs i bruk år 2004. UIC 406-metoden har omfattande tagits i bruk i Europa och erfarenheterna har varit mycket positiva. I detta arbete har UIC 406-metoden tillämpats på fallstudieobjekten under dygnets två livligaste timmar. Undersökningen påvisade att det med metoden är enkelt att beräkna kapacitetsutnyttjandet på banavsnittet och resultaten som metoden ger är enligt tidigare undersökningsresultat relativt tillförlitliga. Mängden utgångsuppgifter som behövs och den noggrannhetsnivå som krävs utgör dock ett problem i denna metod. UIC 406-metoden lämpar sig bäst vid jämförelse av två eller flera tidtabellsalternativ, exempelvis en nuvarande och en planerad.

Analyseringarna av punktlighetsstatistikerna från JUSE påvisade i samband med detta arbete att banavsnittets kapacitet även i Finland kan analyseras med hjälp av bokförd punktlighet. Resultaten av detta arbete var, trots liten mängd observationer, lovande och påvisade att det även i fortsättningen lönar sig att utnyttja punktlighetsstatistiker för kapacitetsgranskningarna.

Pitkänen, Jukka-Pekka: Improving methods for evaluating rail capacity. Finnish Rail Administration, Traffic System Department. Helsinki 2006. Publications of the Finnish Rail Administration A 4//2006. 146 pages and 5 appendices. ISBN 952-445-145-x, ISBN 952-445-146-8 (pdf), ISSN 1455-2604.

SUMMARY

This master's thesis examines and introduces several methods for evaluating rail line capacity. The main goal of this study is to find a simple and reliable method for measuring rail line capacity in Finnish circumstances. A second goal is to study the possibilities of using train punctuality data in capacity analysis. The data used in this analysis was gathered from the new train punctuality reporting system JUSE, which was introduced in January 2005.

As rail capacity is a relative concept, it is difficult to find a reliable method for analysing it. Track capacity is influenced, for instance, by such train variables as the driving speed, the track geometry, and the particular characteristics of the safety and automatic train protection systems.

In addition, rail capacity is influenced by the structure of the train timetable. Greater capacity can be attained if trains are grouped, so that the trains with similar speeds and directions will travel in succession. Due of the conflicting needs of the train operators, however, achieving such ideal circumstances is often impossible.

Four of the methods examined in this thesis were implemented in a case study where the capacity of two individual track lines was calculated: the Seinäjoki–Oulu and Luumäki–Imatra lines. Both of these lines are heavily operated, and their infrastructure is beginning to be insufficient for the needs of the current level of traffic.

The results of the case studies varied greatly depending on the method used. In the future, it should be possible to improve the accuracy of the results and the reliability of the calculation methods by adding coefficients and factors calibrated to the Finnish circumstances.

In addition to the examination of the capacity calculation methods, the capacity consumption of both lines was calculated. This calculation was done by using the UIC 406 method, introduced in 2004 by the International Union of Railways (UIC). This method has been widely used elsewhere in Europe, where it has received great acclaim. In this study the capacity consumption was calculated for peak hour traffic. The study showed that the capacity consumption can be easily calculated with the UIC 406 method, and that the results gained are relatively reliable. It is problematic, however, that the method requires a large number of accurate values from pre-existing timetable.

The train delay analysis showed that it is possible to use data gathered from the JUSE in capacity research. The results gained in this study were promising, and recommend the continuation of the train delay research in the future when the JUSE has made more data available.

ALKUSANAT

Tutkimuksen on laatinut tekniikan ylioppilas Jukka-Pekka Pitkänen Ratahallintokeskuksen liikennejärjestelmäosastolla 7.2.–31.10.2005 välisenä aikana. Tutkimus on samalla tekijän diplomityö Teknillisen korkeakoulun rakennus- ja ympäristötekniikan osastolle.

Työtä varten perustettiin ohjausryhmä, johon kuuluivat professori Timo Ernvall (diplomityön valvoja), ylitarkastaja Jukka Ronni (diplomityön ohjaaja) sekä liikennejohtaja Anne Herneoja. Heidän lisäksi useat koti- ja ulkomaiset asiantuntijat ovat edistäneet työn etenemistä haastatteluiden, sähköpostikeskusteluiden sekä lähettämiensä tutkimustulosten ja muiden raporttien muodossa.

(Tutkimuksessa esitetyt mielipiteet ja päätelmät ovat kirjoittajan omia, eikä Ratahallintokeskus sitoudu niihin.)

Helsingissä, syyskuussa 2006

Ratahallintokeskus

Liikennejärjestelmäosasto

TYÖSSÄ KÄYTETYT MÄÄRITELMÄT JA LYHENTEET

Graafinen aikataulu on yksi aikataulujen esittämismuoto, jossa junien kulku esitetään käyrinä matka-aika -koordinaatistossa. (Mäkitalo 2001).

JKV on lyhyenne sanoista junien automaattinen kulunvalvontajärjestelmä. JKV:n avulla varmistetaan, että juna noudattaa asetettuja nopeusrajoituksia ja opasteita (Niemimuukko 2004).

Junaväli on kahden peräkkäisen, samaan suuntaan ajavan junan aikaväli (Pachl 2002).

JUSE (JUnien kulun SEurantajärjestelmä) seuraa junien kulkua Suomen rataverkolla. Vuoden 2005 alkaen junien myöhästymistilastojen laatiminen on perustunut JUSEsta saataviin tietoihin. (Raaska 2004 & Blomqvist 2005.)

Kapasiteetti ilmoittaa rataosalle, liikennepaikalle, ratapihalle tai suurimman mahdollisimman junamäärän aikayksikköä kohden (Pachl 2002).

Kapasiteetin käyttöaste ilmoittaa sen osuuden (%) teoreettisesta kapasiteetista, mikä on varattu aikataulun mukaiselle liikenteelle (UIC 2004).

Kiinteäsuojavälinen suojastus tarkoittaa suojastusjärjestelmää, jossa suojastusvälit määritetään kiinteiden opastimien avulla (Pachl 2002).

Kriittinen opastinväli on rataosan se opastinväli, jonka ajamiseen junilta kuluu eniten aikaa. (Pachl 2002).

Käytännön kapasiteetti kertoo suurimman mahdollisen liikennesuoritteen arvon siten, että kapasiteetin maksimimäärää on rajoitettu todenmukaisten liikennöintiaikoihin. Lisäksi toisin kuin teoreettinen kapasiteetin arvossa on käytännön kapasiteetissa huomioitu huolto- ja kunnossapitotöiden vaikutus. Rajoituksista johtuen käytännön kapasiteetti on aina pienempi kuin teoreettinen kapasiteetti. (Viegas et al. 2003.)

Liiketaloudellisesti kiinnostavalla kapasiteetilla (engl. Business Capacity) tarkoitetaan sitä osaa käytännön kapasiteetista, joka kiinnostaa liikennöitsijöitä liiketaloudellisesti (Čapek 2005).

Linjakapasiteetti ilmoittaa rataosan peräkkäisten liikennepaikkojen välisten rataosien suurimman mahdollisen junasuoritteen aikayksikköä kohden.

Ohiajovaralla varmistetaan junien turvallinen pysähtyminen opastimen jälkeen sellaisissa tilanteissa, joissa juna ei jostain syystä pysähdy opastimen valon ollessa punaisena. Pääsääntöisesti ohiajovara mitoitetaan vastaamaan junan jarrutusmatkaa nopeudesta, joka junalla todennäköisesti olisi ohiajotilanteessa. (RHK 1998.)

Opastinväli on kahden peräkkäisen opastimen välinen etäisyys (Landex & Kaas 2005).

Pelivara on junan teoreettiseen ajoaikaan lisättävä aika, jolla varaudutaan mahdollisiin häiriöihin. Pelivara tekee aikatauluista vakaampia, ja sen ansiosta liikenne palautuu nopeammin mahdollisista häiriöistä. (UIC 2004.)

Suojastus on turvalaitekokonaisuus, joka valvoo raidevirtapiisien tai akselinlaskentalaitteiston avulla opastimen suojaaman alueen vapaana olon. Suojastus voi olla joko kiinteä tai vaihtuvavälistä. (Niemimuukko 2004.)

Suojaväli on kiinteäsuojavälinen suojastuksella varustetulla radalla kahden pääopastimen välinen etäisyys. Suojavälillä saa kulkea ainoastaan yksi juna kerrallaan. (Pachl 2002.)

Teoreettinen kapasiteetti on kapasiteetin laskennallinen maksimiarvo. Rataosan liikennemäärä voi kasvaa ainoastaan lyhyiksi hetkiksi teoreettisen kapasiteetin suuruisiksi. (Viegas et al. 2003.)

Vaihtuvasuojavälinen suojastus (engl. Moving Block System). Vaihtuvavälisessä suojastuksessa suojastusväli ei perustu kiinteisiin opasteisiin, vaan se määrittyy peräkkäin ajavien junien nopeuksien perusteella. (Pachl 2002.)

SISÄLLYSLUETTELO

TYÖSSÄ KÄYTETYT MÄÄRITELMÄT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	12
2 TAUSTAA	15
2.1 Kapasiteetti käsitteenä	15
2.2 Kapasiteetin eri näkökulmat	17
2.3 Toimijat Suomessa	18
2.4 Kilpailun avautuminen ja lainsäädäntö	18
2.5 Kapasiteetin jakaminen	19
3 KAPASITEETTIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	22
3.1 Infrastruktuuri	22
3.1.1 Ratageometria ja nopeusrajoitukset	22
3.1.2 Opastinvälit ja suojastus	24
3.2 Kaluston ominaisuudet	29
3.3 Aikataulu	31
3.3.1 Aikataulurakenteen vaikutus kapasiteettiin	31
3.3.2 Vakioaikataulu	34
3.4 Matkustajista aiheutuvat viiveet	36
3.5 Kapasiteetin lisääminen	37
4 KÄYTÖSSÄ OLEVIA MENETELMIÄ KAPASITEETIN MITTAAMISEEN	39
4.1 Yleistä menetelmistä	39
4.2 Suomessa kapasiteettianalyysihin käytettyjä menetelmiä	39
4.2.1 Banverketin menetelmä	39
4.2.2 Pääreittiselvitys	41
4.3 UIC 406 -laskentamenetelmä	42
4.3.1 Yleistä menetelmästä	42
4.3.2 Kapasiteetin käyttöasteen laskeminen	42
4.3.3 Kokemuksia UIC-menetelmän käytöstä Ruotsissa ja Itävallassa	44
4.3.4 UIC 405 -menetelmä	47
4.4 Saksalaisia menetelmiä kapasiteettianalyysihin (Pachl 2002)	50
4.5 Portugalilaiset CAP 1 ja CAP 2 -mallit (Moreira et al. 2003)	52
4.6 Sveitsiläinen CAPACITY-malli (Viegas et al. 2003)	57
4.7 Italialaisia menetelmiä kapasiteetin laskemiseen	60

4.7.1	Italialainen menetelmä teoreettisen maksimikapasiteetin laskemiseksi	60
4.7.2	Bianchin malli (Galaverna & Sciotto 2004):	61
4.7.3	Ferrovie dello Staton menetelmä (Galaverna & Sciotto 2004)	62
4.7.4	Corrieren teoria (Galaverna & Sciotto 2004)	62
4.7.5	Reitanin ja Malaspinan teoria	63
4.8	Puolalainen menetelmä maksimikapasiteetin laskemiseen	65
4.9	Japanilaisia menetelmiä kapasiteetin mittaamiseen	65
4.9.1	Yamagishin teoria (Yamagishi 1942)	65
4.9.2	Nishinon teoria (Takahashi 1962)	70
4.9.3	Pelkistetty japanilainen laskentakaava	73
4.10	Tawastin kaava	73
4.11	Arvio ja yhteenveto linjakapasiteetin laskentamenetelmistä	76
4.12	Myöhästymistilastojen analysointi	79
4.13	Simulointi	83
5	LIIKENNEPAIKKOJEN JA RATAPIHOJEN KAPASITEETTI	86
5.1	Yleistä	86
5.2	Ratapihan kapasiteetti	86
5.3	Liikennepaikan kapasiteetti	90
5.4	Rataverkon kapasiteetti	92
6	TAPAUSTUTKIMUKSET	96
6.1	Yleistä tutkimuksista	96
6.2	Kapasiteettitarkasteluiden lähtötiedot	97
6.3	Rataosan Seinäjoki–Oulu kapasiteettitarkastelut	98
6.3.1	Yleistä rataosasta	98
6.3.2	Rataosan linjakapasiteetin laskennat	99
6.3.3	Kapasiteetin käyttöasteen laskenta UIC-406 menetelmällä	104
6.4	Rataosan Luumäki–Imatra kapasiteettitarkastelut	105
6.4.1	Yleistä rataosasta	105
6.4.2	Kapasiteettilaskennat	107
6.4.3	Kapasiteetin käyttöasteen laskenta UIC 406 -menetelmällä	110
6.5	Kapasiteettianalyyseissa saatujen tulosten vertailu	111
6.5.1	Kapasiteettilaskentojen laskentatulosten vertailu	111
6.5.2	Kapasiteetin käyttöasteen laskentatulosten tarkastelu	114
6.6	Myöhästymistilastojen analysointi	115
6.6.1	Yleistä tarkastelusta	115
6.6.2	Myöhästymistilastojen analysoinnissa käytetyt lähtötiedot	115

6.6.3 Yksiraiteisten rataosien regressioanalyysit	119
6.6.4 Kaksi- ja useampiraiteisten rataosien regressioanalyysit	125
6.7 Rataosien Seinäjoki–Oulu ja Luumäki–Imatra myöhästymistapausten vertailu	131
7 KESKEISIMMÄT HAVAINNOT JA JOHTOPÄÄTÖKSET TUTKIMUKSESTA	136
LÄHDELUETTELO	140
8 LIITTEET	147

1 JOHDANTO

Tämän työn tavoitteena on kirjallisuustutkimuksen ja asiantuntijahaastattelujen perusteella löytää mahdollisimman yksiselitteinen ja yksinkertainen analyytinen menetelmä ratakapasiteetin mittaamiseen. Työn toinen tavoite on selvittää uuden junien kulun seurantajärjestelmän JUSEn käyttökelpoisuus kapasiteettitarkasteiluissa. JUSEn soveltuvuutta kapasiteettianalyysiin on tutkittu pääasiassa JUSEen kirjatuille myöhästymistilastoille tehdyillä regressioanalyysillä.

Oman haasteensa menetelmien löytämiseen tuo Suomen rataverkon suuri yksiraiteisten ratojen määrä (Hovi 2005). Useissa Euroopan maissa, joissa kapasiteettianalyysijä ja tutkimusmenetelmiä on kehitetty pitkäjänteisesti, rataverkko koostuu pääosin kaksi- tai useampiraiteisista rataosista. Tällaisia maita ovat muun muassa Saksa ja Alankomaat. Näissäkin maissa on kuitenkin tehty paljon työtä myös yksiraiteisten ratojen kapasiteetin laskemismenetelmien kehittämiseksi. Pääsyy tähän on se, että yksiraiteiset rataosat ovat koko rataverkon välityskyvyn kannalta paljon kriittisempiä kuin kaksi- tai useampirataiset rataosat (Pachl 2005).

Yksi ongelmallisimmista tekijöistä kapasiteetin laskennassa on tavaraliikenteen vaikea ennustettavuus. Koska tavaraliikenteen kulloiseenkin kysyntään vaikuttavat tarkasteltavan alueen yritysten markkinasuunnitelmat, taloudellinen tilanne sekä yleinen kilpailutilanne, on lähes mahdotonta arvioida muutoksia liikenteen kysynnässä kovinkaan moneksi vuodeksi eteenpäin. Ongelma korostuu erityisesti vertailutilanteissa, joissa liikenteellisin perustein arvioidaan esimerkiksi kahden tai useamman rataosan investointitarpeita. (Kosonen 2005 & Hovi 2005)

Koko rataverkkoa tarkasteltaessa kapasiteetti voidaan määrittää joko liikennöitäviltä linjoilta, liikennepaikoilta tai ratapihoilta. Tämä diplomityö on lähtökohtaisesti rajattu käsittelemään ainoastaan linjakapasiteettia ja sen mittaamismenetelmiä. Koska kaikki edellä mainitut osakapasiteetit ovat välittömässä yhteydessä toisiinsa ja vaikuttavat toistensa käyttöasteeseen, on liikennepaikka- ja ratapihakapasiteetin mittaamismenetelmistä kerrottu lyhyesti luvussa 5.

Toinen sisällöllinen raja koskee kapasiteetin mittaamismenetelmiä. Ratakapasiteettia ja sen käyttöastetta voidaan laskea simulointiohjelmien sekä analyytisten ja tilastollisten menetelmien avulla (Mattson 2005). Tässä työssä käsitellään ainoastaan analyytisiä menetelmiä ja kaikki simulointi- ja ratakapasiteetin hallinta -ohjelmat on rajattu tarkastelun ulkopuolelle. Raja on perusteltu, koska Ratahallintokeskuksella on aiemmin tehtyjen tutkimus- ja selvitystöiden perus-

teella tietoa erilaisten tietokoneavusteisten kapasiteetin mittaamismenetelmien ominaisuuksista. Lisäksi analyyttisillä menetelmillä päästään välityskykylaskennoissa usein riittävään tarkkuuteen ja analyyttisillä menetelmien käyttäminen on huomattavasti edullisempaa kuin esimerkiksi monimutkaisen simulointimallin rakentaminen (Pachl 2002). Simulointiohjelmista ja niiden ominaisuuksista kerrotaan kuitenkin lyhyesti luvussa 4.13.

Kapasiteetin analyyttisiä laskentamenetelmiä ovat Suomessa aiemmin tutkineet ainakin Junnila (1974), Tawast (1974), Ronni (1994) ja Peltohaka (1972). Vaikka ensimmäisenä mainittu Junnila (1974) arvioikin tutkimuksessaan, että jokaisen maan rataverkolla on omat erityispiirteensä, eivätkä toisen maan laskentamenetelmät sovellu sellaisinaan Suomeen, on tässä työssä etsitty laskentamenetelmiä pääasiassa Suomen rajojen ulkopuolella. Syy tähän on mm. Ruotsin rautatieviranomaisen Banverketin saamat hyvät kokemukset kansainvälisten menetelmien käytöstä (Wahlborg 2005), sekä useiden yhteiseurooppalaisten järjestöjen, kuten kansainvälisen rautatieliiton UIC:n viimeaikainen pyrkimys yhdistää maailmalla käytettyjä kapasiteetin laskentaperiaatteita. Ulkomaisen menetelmän soveltuvuusmahdollisuutta Suomen olosuhteisiin lisää myös se, että viime vuosien aikana Euroopan maiden rataverkkojen infrastruktuuria ja radoilla liikennöivää kalustoa on pyritty harmonisoimaan uusien yhteisten ohjeiden avulla (Ronni 2005).

Viime vuosina suurin osa suomalaisista kapasiteettitarkasteluista on tehty simulointiohjelmien avulla (esimerkiksi RHK 2002a ja RHK 2004a). Poikkeuksen tähän tekee kuitenkin vuonna 1999 valmistunut Ratahallintokeskuksen tilaama rataverkon kapasiteetin käyttöaste -selvitys (RHK 1999), jossa koko Suomen rataverkon kapasiteetin käyttöasteet laskettiin ruotsalaisen Banverketin menetelmän mukaisesti.

Lukuun 4 on kerätty asiantuntijahaastatteluiden ja kirjallisuusselvityksen perusteella maailmalla käytettyjä menetelmiä kapasiteetin ja sen käyttöasteen mittaamiseen. Lisäksi luvussa on arvioitu menetelmien soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin.

Arvioinnin perusteella parhaiten Suomeen soveltuvat menetelmät on otettu mukaan tapaustutkimuksiin, joissa valittuja menetelmiä on käytetty kahden ennalta valitun rataosan kapasiteetin laskemiseen. Tapaustutkimukseen valitut rataosat ovat Seinäjoki–Oulu ja Luumäki–Imatra.

Seinäjoki–Oulu -rataosa on viime aikoina ollut yksi Suomen rataverkon tutkimmista rataosista. Rataosa on vilkkaasti liikennöity ympäri vuorokauden ja liikenteenkasvun on ennustettu jatkuvan rataosalla merkittävänä. Välin parantamisesta valmistui tarveselvitys vuonna 2003, jossa todettiin, että kapasiteetti on yöaikoina, jo tällä hetkellä kokonaan käytössä (RHK 2003b). Kapasiteetin ja ai-

kataulusuunnittelun kannalta rataosan yksi suurimmista ongelmista on sellaisten junien suuri määrä, jotka liikennöivät koko rataosan läpi. (Kosonen 2005).

Rataosa Luumäki–Imatra on puolestaan mielenkiintoinen tarkastelukohde suuren tavaraliikennesuoritteen ja kansainvälisen merkityksensä vuoksi. Rataosan tavaraliikenne on Suomen mittakaavassa erittäin vilkasta ja kapasiteetti on ajoittain täysin käytössä. Lisäksi lisäpainetta rataosalle tuo Suomen ja Venäjän välisen tavarajunaliikenteen ennustettu kasvu sekä Helsingin ja Pietarin välisen nopean henkilöliikenteen alkaminen. Erään liikennöintivaihtoehdon mukaan suurin osa Venäjän ja Suomen välisistä tavarajunista siirtyisi kulkemaan rataosaa Luumäki–Imatra nopean henkilöjunaliikenteen alkaessa Helsingin ja Pietarin välillä (RHK 2005a).

2 TAUSTAA

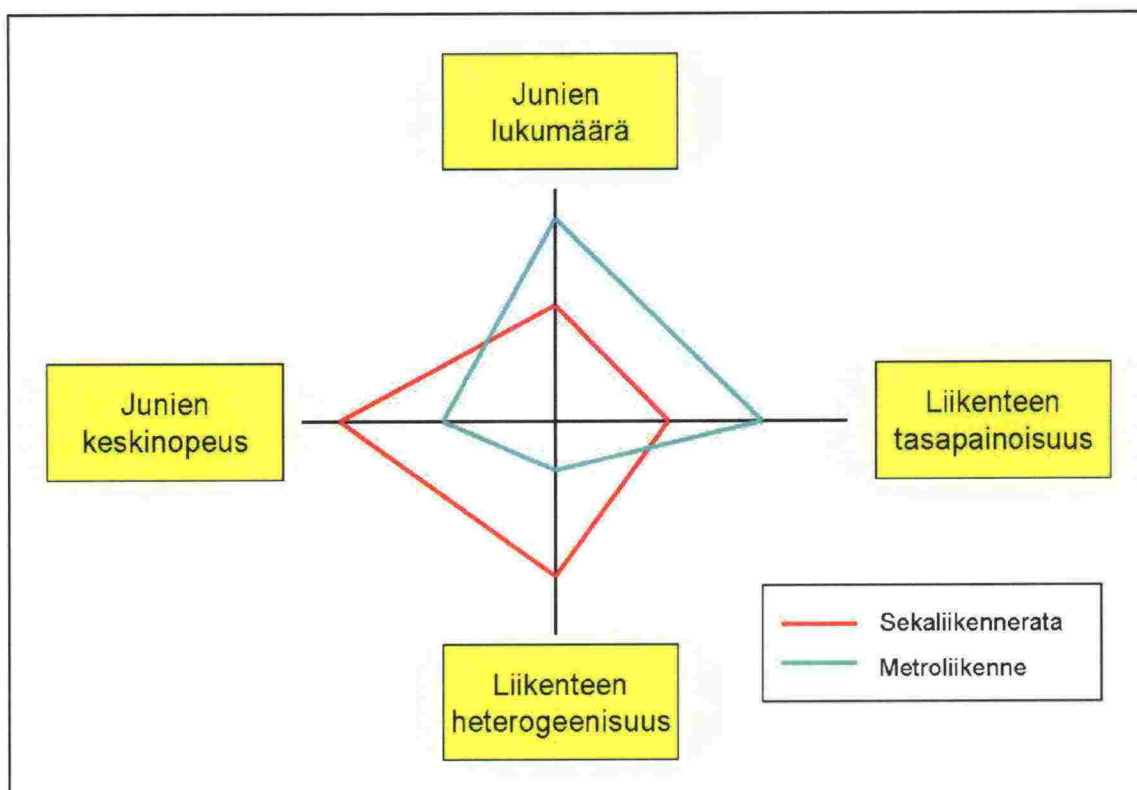
2.1 Kapasiteetti käsitteenä

Yleisessä keskustelussa etenkin kapasiteetin ja aikataulun käsitteiden merkitys on usein sekoitettu keskenään. Aikataululla tarkoitetaan junan kulkusuunnitelmaa, jonka pohjana on junan teoreettinen minimiajoaika tarkasteltavalla välillä. Tähän teoreettiseen ajoaikaan lisätään yleensä pieni pelivara, jolloin juna voi saapua määräasemalleen ”ajoissa” matkalla sattuneesta pienestä viiveestä huolimatta. Aikataulu liittyy siis aina yhteen tai useampaan junaan. (Mäkitalo 2003.)

Ratakapasiteetilla arvioidaan tarkasteltavan radan tai sen osan välityskykyä. Rautatieliikenteessä kapasiteetti ilmoittaa maksimijunamäärän, joka voi määrättyllä rataosalla liikennöidä tietyn ajanjakson aikana. Toisin sanoen ratakapasiteetin yksikkö on junaa per aikayksikkö, esimerkiksi junaa/h tai junaa/d. (Mäkitalo 2003.)

Lisäksi on vielä hyvä tehdä ero ratakapasiteetin ja sen käytön välille. Kun ratakapasiteetti liittyy aina rataan, on ratakapasiteetin käyttö -termi sidoksissa junaan. Toisin sanoen ratakapasiteetin käytöllä tarkoitetaan junan varaamaa aikaa tarkasteltavalta rataosalta. (Mäkitalo 2003)

Kansainvälisen rautatieliiton UIC:n (2004) määrittelyn mukaisesti ratakapasiteetti on suhteellinen käsite, eikä sen määrää ole mahdollista yksiselitteisesti mitata. Ratakapasiteetti riippuu useasta itsenäisestä tekijästä, joiden yhteisvaikutuksesta ja käyttötavasta rataosan maksimivälityskyky muodostuu. Kuvassa 1 on esitetty näiden tekijöiden väliset vuorovaikutukset ja niiden vaikutus ratakapasiteettiin. Viivan pituus kuvaa kapasiteettia ja viivojen ja akseleiden leikkauskohdat kuvaavat kapasiteetin käyttöä.



Kuva 1. Kapasiteetin tasapaino (UIC 2004).

Kuvassa 1 esiintyvät tekijät vaikuttavat kapasiteettiin seuraavasti (UIC 2004):

- **Junien lukumäärä.** Junatiheyden kasvaessa liikennöinnin laatu heikkenee radalla.
- **Junien keskinopeus.** Junien keskinopeudella on välitön vaikutus ratakapasiteetin määrään, mutta vaikutus ei kuitenkaan ole suoraviivainen. Syy tähän on jarrutusmatkan suurempi suhteellinen kasvu ajonopeuden nousuun verrattuna. Tällä on kuitenkin merkitystä ainoastaan niillä rataosilla, joilla on käytössä vaihtuvasuojavälinen suojastus. Kiinteäsuojavälisellä suojastuksella varustetuilla rataosilla opastinvälit ovat yleensä niin pitkiä, ettei jarrutusmatkan piteneminen vähennä ratakapasiteettia.
- **Liikenteen tasapainoisuus.** Jotta liikennöinti olisi tasapainoista ja toipuisi nopeasti mahdollisista häiriöistä, tulee junan kulkusuunnitelmiin lisätä jonkin verran ylimääräistä aikaa. Toimenpide parantaa liikennöinnin luotettavuutta ja laatutasoa, mutta samanaikaisesti kasvattaa kapasiteetin käyttöastetta.
- **Heterogeenisuus.** Rataosan kapasiteetti vähenee, jos eri junien ajoaikojen erot ovat suuria.

2.2 Kapasiteetin eri näkökulmat

Tarkastelunäkökulmasta riippuen voidaan tietyn rataosan kapasiteetin määräksi saada hyvin erisuuruisia tuloksia. Ratakapasiteettia voidaan tarkastella ainakin seuraavilla tarkkuustasoilla, jolloin kapasiteetin määrä vähenee listaa alaspäin mentäessä:

- teoreettinen kapasiteetti
- käytännön kapasiteetti
- liikennöintiajat huomioon ottava kapasiteetti
- liiketaloudellisen toiminnan kannalta kiinnostava kapasiteetti

Teoreettinen kapasiteetti on laskennallinen maksimiarvo, joka käytännössä voidaan saavuttaa korkeintaan hetkellisesti (Viegas et al. 2003). Useat kapasiteetin laskentamenetelmät antavat lopputulokseksi juuri teoreettisen maksimikapasiteetin. Tällaista tulosta voidaan hyvin käyttää eri toimenpidevaihtoehtojen ja rataosien keskinäisessä vertailussa, mutta sen perusteella ei tule laatia rataosan aikataulusuunnitelmaa.

Käytännön kapasiteetti eroaa teoreettisesta kapasiteetista siten, että siinä otetaan huomioon radanpidon vaatimat toimet vähentämällä kunnossapidolle ja vastaaville toimenpiteille varatut ajat teoreettisesta maksimiarvosta (Viegas et al. 2003). Käytännön kapasiteetti on teoreettista arvoa todenmukaisempi raja-arvo, ja sen perusteella on mahdollista tehdä alustavia suunnitelmia liikennöitävien junien määrästä tarkasteltavalla rataosalla.

Osa olemassa olevista teorioista erottelee käytännön kapasiteetista vielä omaksi arvokseen tarkemman näkökulman, jossa otetaan paremmin huomioon rataosan junatyypin- ja liikennöintiaikajakaumat. Tässä niin sanotussa liikennöintiajat huomioon ottavassa kapasiteetissa käytännön kapasiteettia pienennetään antamalla rajoituksia olemassa olevan tai suunnitteella olevan liikennöinnin perusteella. Rajoitukset perustuvat muun muassa tiettyjen junatyypien liikennöintiaikoihin ja aikataulujen mahdolliseen jaksollisuuteen. (Moreira et al. 2004.)

Edellä esitettyjen näkökulmien lisäksi voidaan määrittää myös niin sanottu liiketaloudellisesti kiinnostava kapasiteetista (engl. business capacity). Tällä tarkoitetaan sellaista kapasiteettia, joka on liikennöitsijän kannalta liiketaloudellisesti kiinnostavaa kapasiteettia. Esimerkiksi aamuyön tunnit henkilöliikenneraldalla eivät välttämättä ole kovinkaan haluttuja liikennöintiaikoja etenkin silloin, jos rataosan määräasemien välimatka on suhteellisen lyhyt, eikä makuupaikoin varustettujen yöjunien liikennöintiä voida pitää järkevänä vaihtoehtona. (Čapek 2005.)

Liiketaloudellisesti kiinnostavan kapasiteetin määrän suuruus määräytyy markkinoiden kysynnän mukaan. Toisin sanoen kapasiteetin suuruus riippuu muun muassa kunkin maan ja rataosan kilpailutilanteesta, yhteiskunnan tuista rautatieliikenteelle, lainsäädännöstä sekä matkustaja- ja tavarankuljetusmääristä, eikä liiketaloudellisesti kiinnostavalle kapasiteetille näin ollen voida määrittää yksiselitteistä laskentakaavaa. Suurimmillaan liiketaloudellinen kapasiteetin määrä voi kuitenkin olla yhtä suuri kuin edellä mainitun liikennöintiajat huomiioon ottavan kapasiteetin. (Čapek 2005.)

Liiketaloudellisesti kiinnostavan kapasiteetin merkitys kasvaa täysin kilpailutetuilla rataverkoilla, joissa infrastruktuurin haltijat toivovat rataverkkonsa olevan mahdollisimman tehokkaassa käytössä. (Čapek 2005.)

Yksi tapa lisätä liikennöitsijöiden kiinnostusta epäedullisia liikennöintiaikoja kohtaan, voisi olla ratamaksujen merkittävä alentaminen sellaisilla rataosilla, jotka eivät ole olleet liikennöitsijöille kovinkaan houkuttelevia. Toinen mahdollinen tapa lisätä liiketaloudellisesti kiinnostavan kapasiteetin määrää on tukea yhteiskunnan varoin kannattamattomien vuorojen liikennöintiä.

2.3 Toimijat Suomessa

Suomessa Ratahallintokeskus omistaa ratainfrastruktuurin ja vastaa ratakapasiteetin jakamisesta sekä ratainvestointien kohdentamisesta (Mäkelä et al. 2002). Lisäksi infrastruktuurin haltijan tulee huolehtia rataverkkonsa kunnosta ja varmistua, että liikennöinti rataverkolla voidaan suorittaa turvallisissa olosuhteissa (Alåsen 1999).

Toistaiseksi valtion rataverkolla ei ole ollut muita toimijoita kuin VR Osakeyhtiö, jolla on ollut lakiin perustuva yksinoikeus harjoittaa rautatieliikennettä valtion rataverkolla. VR Osakeyhtiöllä on tosin yhdysliikennesopimus omalla rataverkollaan liikennöivän Karhulan–Sunilan Rautatie Oy:n kanssa. (Mäkelä et al. 2002.)

Uusia toimijoita valtion rautateille saapuneen vuoden 2007 alussa, jolloin tavaraliikenteen kilpailu avautuu markkinoille (Nummelin 2005). Myös henkilöliikenne tulee EU-direktiivin edellyttämällä tavalla vapautumaan kilpailulle lähivuosien aikana. (Mäkitalo et al. 2004).

2.4 Kilpailun avautuminen ja lainsäädäntö

Rautateiden kehittämisdirektiivi, joka tuli voimaan 1990-luvun alussa, määrää, että kaikkien EU-maiden on erotettava rataverkko ja siellä toimivat kuljetusyrietykset toisistaan. Direktiivivaatimuksen mukaisesti vuonna 1995 Suomessa Val-

tionrautatiet-liikelaitos jaettiin VR-Yhtymä Oy:ksi sekä uudeksi virastoksi, Ratahallintokeskukseksi. (Mäkitalo et al. 2004.)

Vuonna 2001 Euroopan Unioni laati jäsenmailleen rautatieliikennettä koskevan lainsäätökokonaisuuden, josta käytetään myös yleisnimeä ensimmäinen rautatiepaketti. Paketti sisälsi seuraavat kolme direktiiviä, joista kaikista Suomi antoi Euroopan Unionille täytäntöönpanoilmoituksen 5.12.2003. (Mäkitalo et al. 2004.):

- rautateiden kehittämisdirektiivin muutosdirektiivi (91/440/ETY:n muutodirektiivi 2001/12/EY)
- toimilupadirektiivi (95/18/EY:n muutosdirektiivi 2001/13/EY)
- kapasiteetti- ja ratamaksudirektiivi (95/19/EY:n kumoava 2001/14/EY)

Rautateiden kehittämisdirektiivissä on määritelty vähimmäisvelvoitteet rataverkon avaamisesta kilpailulle. Se määrää EU:n jäsenvaltioiden avaavan rataverkkonsa Euroopan talousalueen kansainvälisessä tavaraliikenteessä kokonaisuudessaan. Suomen osalta direktiivi koskee käytännössä koko Ratahallintokeskuksen rataverkkoa ja sillä tapahtuvaa liikennöintiä pois lukien Venäjän yhdysliikenne. (Mäkitalo et al. 2004.)

Vuonna 2002 esiteltiin komission tiedonannosta ja neljästä lainsäädäntöehdotuksesta muodostuva toinen rautatiepaketti, jonka keskeinen sisältö käsitteli tavaraliikenteen kansallisen kilpailun avautumista, Euroopan rautatieviraston perustamista sekä rautateiden eurooppalaisen turvallisuussäätelyn muodostamista. (Mäkitalo et al. 2004.)

Toisen rautatiepaketin edellyttämä tavaraliikenteen kansallisen kilpailun avautuminen oli Suomen kannalta merkittävin poliittinen kysymys (Mäkitalo et al. 2004). Yhteispäätösmenettelyn sovitteluratkaisussa päätettiin, että Suomen tavaraliikenteen kansallinen kilpailu avautuu 1.1.2007 (Nummelin 2005 & Mäkitalo et al. 2004).

Vuonna 2004 Euroopan komissio julkaisi myös kolmannen rautatiepaketin. Kapasiteetin jakamisen kannalta sen keskeisin sisältö käsittelee EU-alueen sisäisen henkilöliikenteen kilpailun avaamista. Näillä näkymin lainsäädäntöehdotuksen edellyttämä henkilöliikenteen kilpailun vapauttaminen voisi tapahtua Suomessa vuonna 2010. (Mäkitalo et al. 2004.)

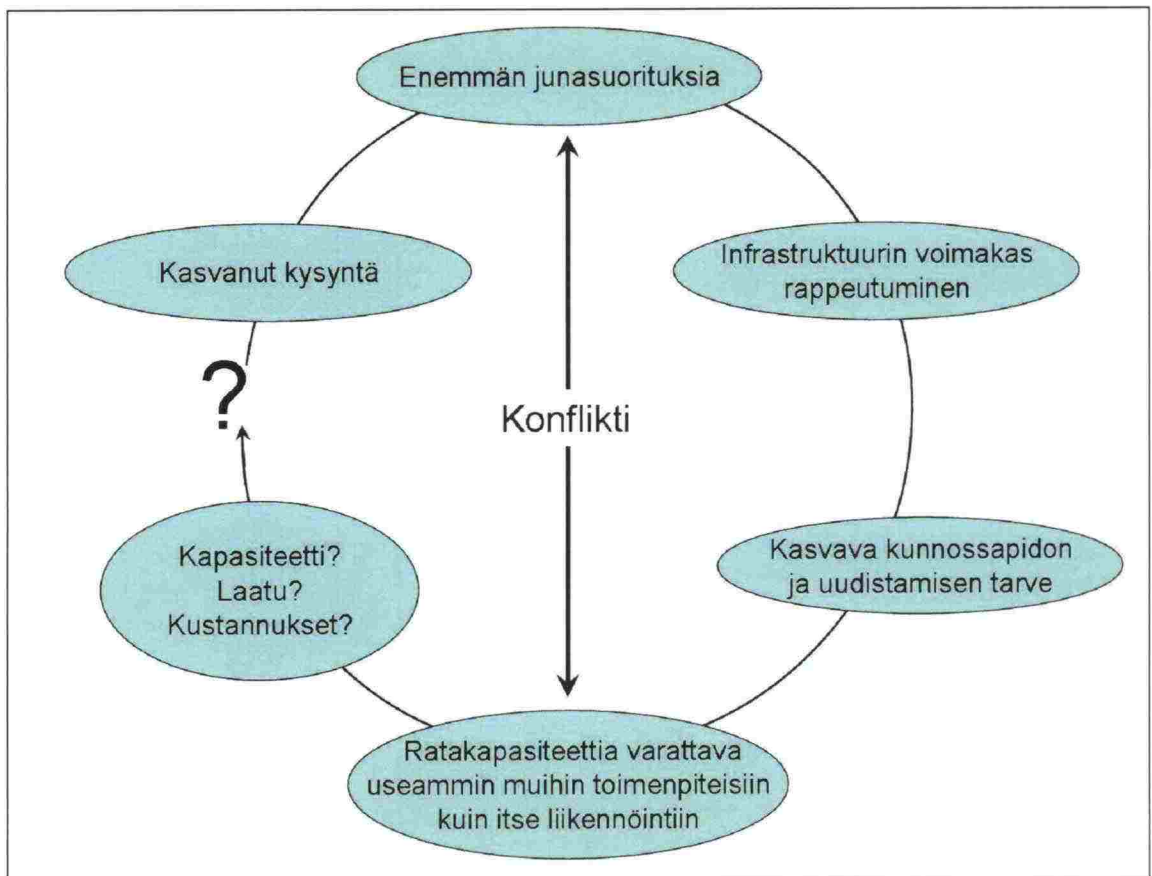
2.5 Kapasiteetin jakaminen

Rautatieyrittäjillä on mahdollisuus anoa Ratahallintokeskukselta valtion rataverkon ratakapasiteettia säännöllistä liikennettä varten. (Mäkitalo et al. 2004).

Ratahallintokeskuksen rataverkolla ei ennen EU:n kilpailutusvaatimusten esittämistä ole käytännössä toiminut kuin yksi liikennöitsijä, VR Osakeyhtiö (Mäkelä et al. 2002).

Ratakapasiteetin jakaminen useamman liikennöitsijän kesken ei sinänsä ole mikään uusi asia. Ensimmäisen kerran useampia toimijoita nähtiin jo vuonna 1825, kun maailman ensimmäinen julkinen rautatie otettiin käyttöön Stocktonin ja Darlingtonin välillä. Tällä yksiraiteisella rautatiellä kuka tahansa sai maksua vastaan liikennöidä oman hevosen ja vaunun kanssa. (Robinson 1998.)

Kapasiteetin hallinnan kannalta infrastruktuurin haltijan yksi tärkeimmistä tehtävistä on välttää kuvassa 2 esitetyn kaltaisen ylikysynnän aiheuttaman ongelman syntyminen. Vastaavasti kapasiteetin ylitarjonta aiheuttaa infrastruktuurin haltijalle epäedullisen tilanteen. (Viegas et al. 2003.)



Kuva 2. Liian kysynnästä syntyvä keskeinen ristiriita infrastruktuurin haltijan kannalta (Viegas et al. 2003).

Kuvan 2 ongelmatilanteessa kasvava liikenteen kysyntä edellyttää uusien junasuoritusten lisäämistä. Kasvava liikenne edellyttää enemmän kunnossapitotoimia, jotka vähentävät mahdollisuuksia lisätä rataosalle uusia junasuorituksia. Tämä aiheuttaa ristiriidan kunnossapidon ja kasvavan junamäärän kapasiteettitarpeiden välillä (Viegas et al. 2003.)

Infrastruktuurin haltijan on kyettävä ratkaisemaan edellä esitetyn kaltaisia ongelmia (Viegas et al. 2003). Kun samalla rataosalla on useita toimijoita, on kaikkien edun mukaista, että jäljellä oleva ratakapasiteetti käytetään mahdollisimman tehokkaasti (Robinson 1998). Viegas et al. (2003) määrittelevätkin infrastruktuurin haltijan päätehtävät kahdeksi vahvasti toisiinsa kytköksissä olevaksi osatehtäväksi: kapasiteetin ja resurssienhallinnaksi.

Kapasiteetin hallinnan päätavoite on tarjota aikataulusta liikennöitsijöille vapaita paikkoja, joissa liikennöinti voidaan suorittaa siten, että se täyttää ennalta määritellyn laatutason. Jotta rautatie voidaan pitää liikennöitävässä kunnossa, Infrastruktuurin haltijan on varattava riittävästä ajasta myös ylläpito- ja kunnostustöille. (Viegas et al. 2003.)

Resurssien hallinnan päätavoitteena on varmistaa infrastruktuurin toimivuus. Infrastruktuurin haltijan tulee vastata rataverkkonsa niin turvallisuudesta, saavutettavuudesta kuin luotettavuudesta. Näihin tavoitteisiin pyrittäessä tulee infrastruktuurin haltijan ottaa huomioon kunkin toimenpiteen elinkaarikustannukset. (Viegas et al. 2003.)

3 KAPASITEETTIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

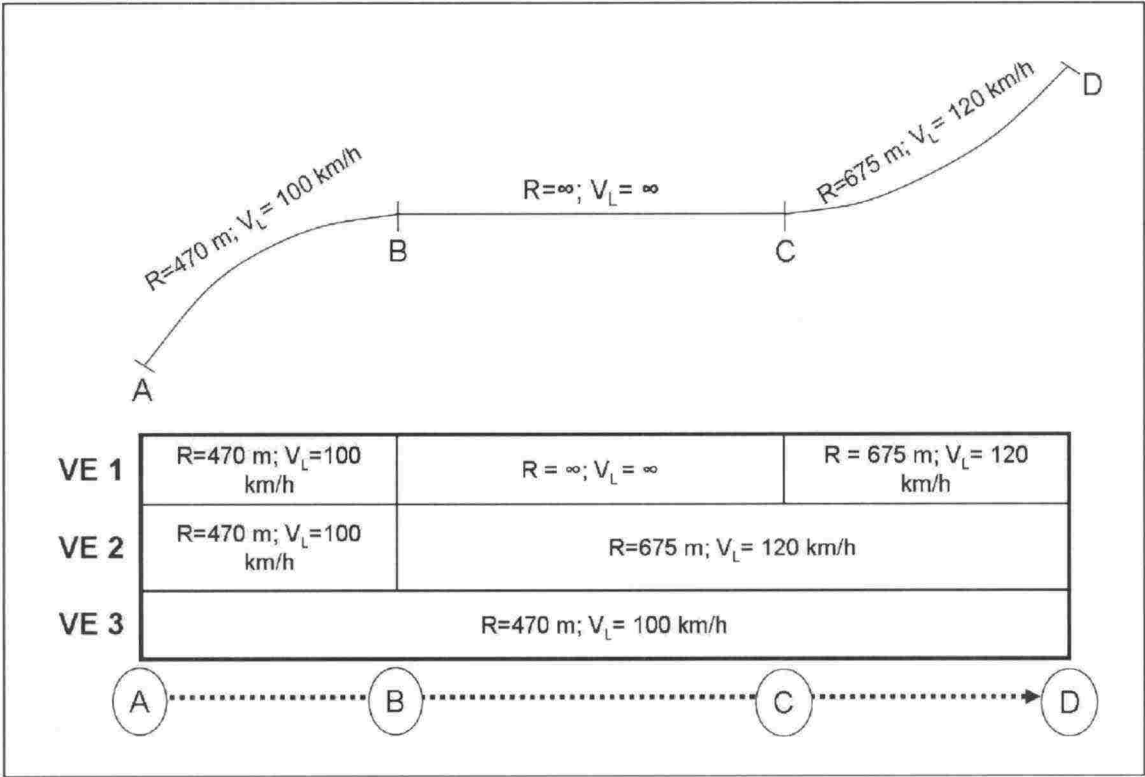
3.1 Infrastrukturi

3.1.1 Ratageometria ja nopeusrajoitukset

Infrastruktuurin kannalta rataosalla olevien raiteiden lukumäärä on suurin yksittäinen kapasiteetin määrään vaikuttava tekijä (Pachl 2002). Raiteiden lukumäärän merkitys korostuu erityisesti silloin, kun verrataan yksi- ja kaksiraiteisen radan kapasiteetteja toisiinsa. Yksiraiteisen radan kapasiteetti on radalla tapahtuvien junakohtaamisten vuoksi selvästi alle puolet kaksiraiteisen radan kapasiteetista. (Pachl 2005.)

Raiteiden lukumäärän lisäksi myös muilla ratageometrian ominaisuuksilla on vaikutusta ratakapasiteetin määrään. Ratageometria muun muassa määrittelee kullekin rataosalle suurimman sallitun ajonopeuden, jolla puolestaan on välitön vaikutus radan kapasiteettiin. Vaakageometrian merkittävin tekijä ratakapasiteettiin on kaarresäteen suuruus, joka useassa tapauksessa määrää yksistään rataosan suurimman sallitun nopeuden. (Crenca et al. 2005.)

Radan kapasiteettiin vaikuttaa myös se, miten rataosan nopeusrajoitus on määriteltä. Kuvassa 3 on havainnollistettu yksinkertaista rataosaa, joka sisältää kaksi kaarta ja yhden suoran osuuden. Kaarteissa suurin sallittu nopeus määräytyy kaarresäteiden mukaan, mutta suoralla osuudella vaakageometria ei aiheuta rajoituksia ajonopeudelle. Teoriassa keskimmaisella osalla voidaan ajaa käytössä olevan kaluston suurinta mahdollista ajonopeutta. Rataosan kapasiteetti määräytyy sen mukaan määrätäänkö koko rataosalle yhteinen nopeusrajoitus (VE 3) vai jaetaanko rataosa kahteen (VE 2) tai kolmeen (VE 1) nopeusrajoitusalueeseen. Näistä vaihtoehdolla 1 saavutetaan suurin liikennesuorite. (Crenca et al. 2005).



Kuva 3. Rataosan nopeusrajoitusten määrittäminen (Crenca et al. 2005).

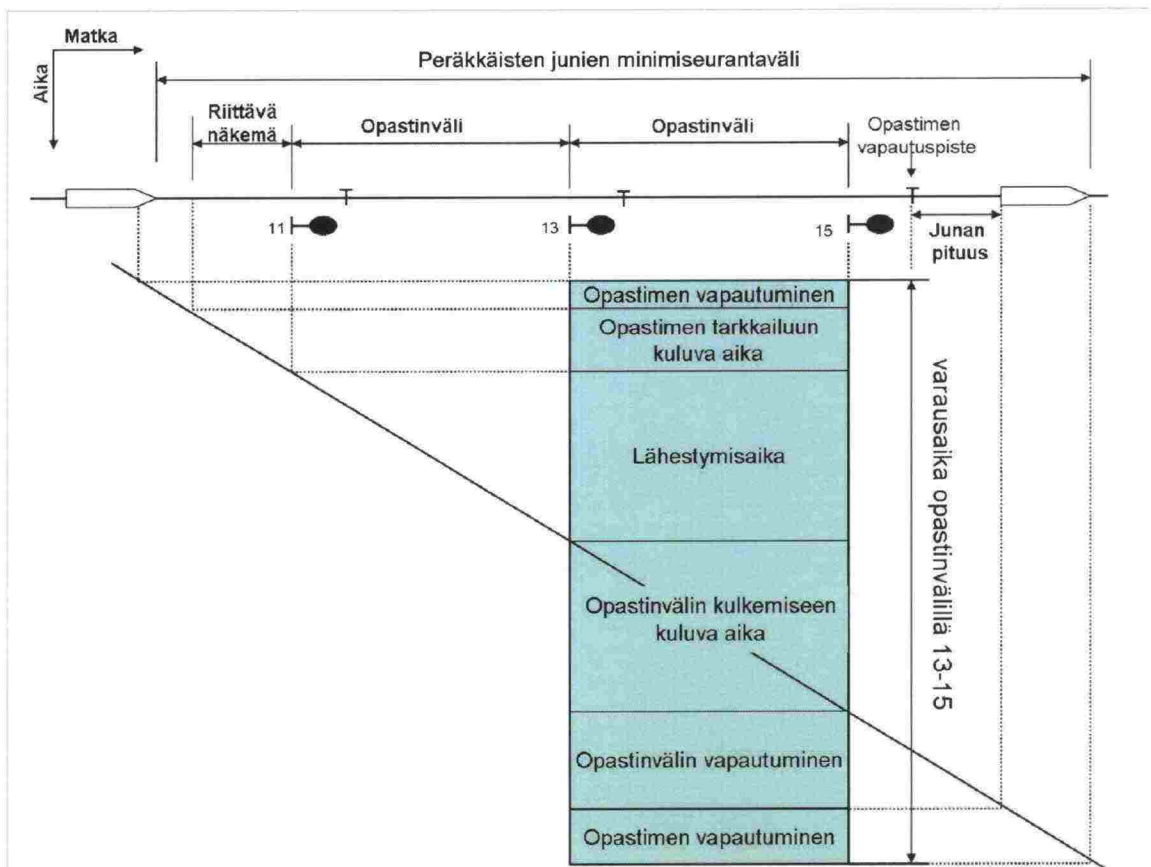
Vaakageometrian lisäksi myös itseisarvoltaan suurella pituuskaltevuudella on vaikutus junan ajodynamiikkaan. Jyrkässä ylämäessä raskaan junan nopeus laskee ja jyrkkä alamäki puolestaan pidentää junan jarrutusmatkaa. Näillä muutoksilla ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta radan kapasiteettiin, eikä pituuskaltevuutta usein otetakaan huomioon välityskykytarkasteluissa. Pituuskaltevuuden on todettu vaikuttavan kapasiteettiin ainoastaan silloin, kuin käytettävän vetokaluston teho ei täytä radan ja junapainon edellyttämiä vaatimuksia. (Crenca et al. 2005.)

Kohtauspaikkojen sijainnilla ja niiden välisillä etäisyyksillä on suuri vaikutus radan linjakapasiteettiin. Useiden laskentamenetelmien teoria perustuu oletukseen siitä, että rataosan kapasiteetti tulee määrittää niin sanotun kriittisen kohtauspaikkavälin perusteella. Kriittiseksi kohtauspaikkaväliksi kutsutaan sitä kahden peräkkäisen kohtauspaikan väliä, jossa junien keskimääräinen ajoaika on kaikkein pisin (Tawast 1974, RHK 1999 & Junnila 1974). Tämän määrittelyn perusteella junakohtauspaikkojen sijainnilla ja niiden välisillä etäisyyksillä on suora vaikutus rataosan kapasiteetin määrään. Tästä johtuen kapasiteetin kannalta paras vaihtoehto olisikin sijoittaa rataosan kohtauspaikat siten, että junien ajoajat rataosan jokaisella välillä olisivat likimain yhtä suuret.

3.1.2 Opastinvälit ja suojustus

Kahden peräkkäisen, samaan suuntaan kulkevan, junan minimijunaväli on riippuvainen rataosan suojustuksesta. Rataosilla, joilla on käytössä kiinteäsuojavälisellä suojustus, minimijunavälit voidaan määrittellä niin sanotun varausaikateorian avulla. Teorian mukaan kokonaisvarausaika voidaan laskea seuraavien ajanjaksojen summana (Kuva 4) (Pachl 2002):

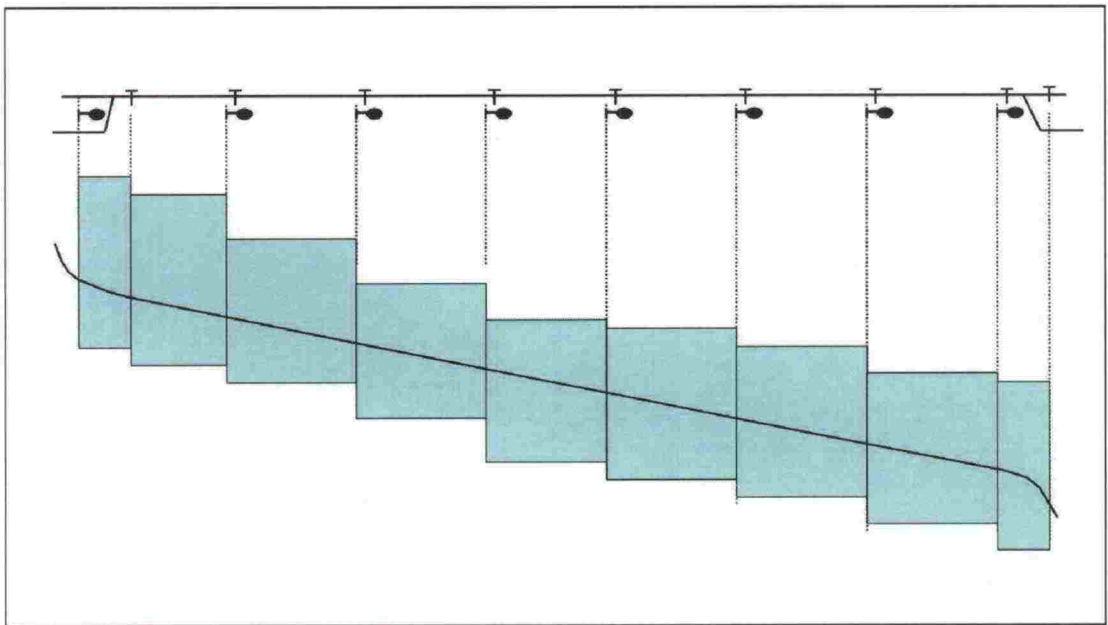
1. opastimen vapauttamiseen kuluva aika
2. aika, joka tulee varata opastimen tarkkailuun
3. junan lähestymiseen kuluva aika
4. opastinväliin kuluva ajoaika
5. opastinvälin vapauttamiseen kuluva aika, jolla tarkoitetaan aikaa, joka junalta kuluu ensin opastimelta opastimen vapautuspisteelle ja edelleen pituutensa mittaisen matkan kulkemiseen
6. opastimen vapauttamiseen kuluva aika



Kuva 4. Opastinvälin varausaika (Pachl 2002).

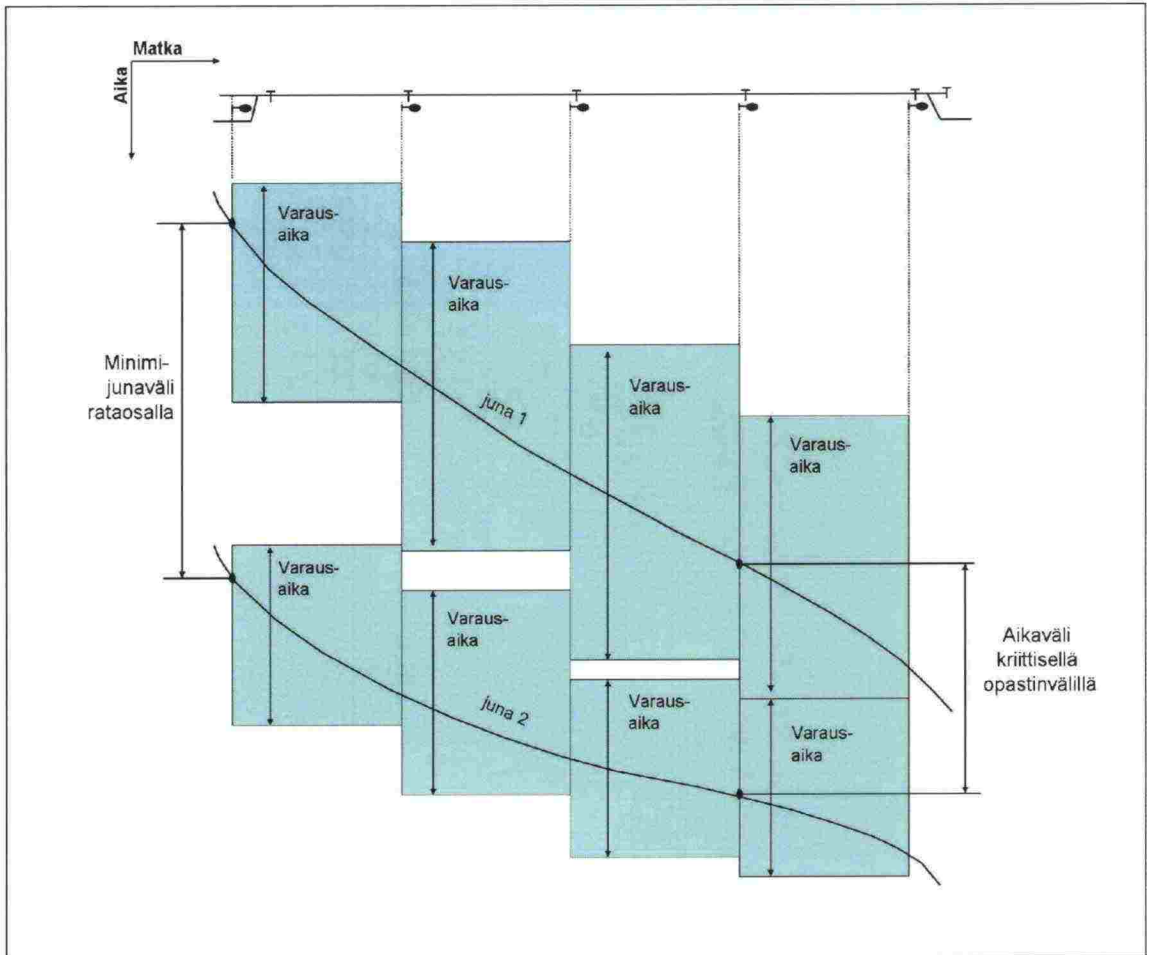
Varausaikateoria esiteltiin ensimmäistä kertaa jo 1950-luvulla, mutta teorian käyttö kapasiteettilaskennoissa on yleistynyt vasta viime vuosikymmeninä. Nykyisin muun muassa kansainvälinen rautatieliitto UIC on päättänyt käyttää varausaikateoriaa kapasiteettianalyysiensa pohjana ja liiton uudet laskentakaavat kapasiteetin käyttöasteenlaskemisesta pohjautuvatkin pitkälti samoihin periaatteisiin. (Wendler 2005.)

Asettamalla yksittäisiä varausaikojen kuvia peräkkäin voidaan tietyn junan varaama aika rataosalla esittää graafisesti matka-aika -koordinaatistossa (kuva 5) (Pachl 2002).



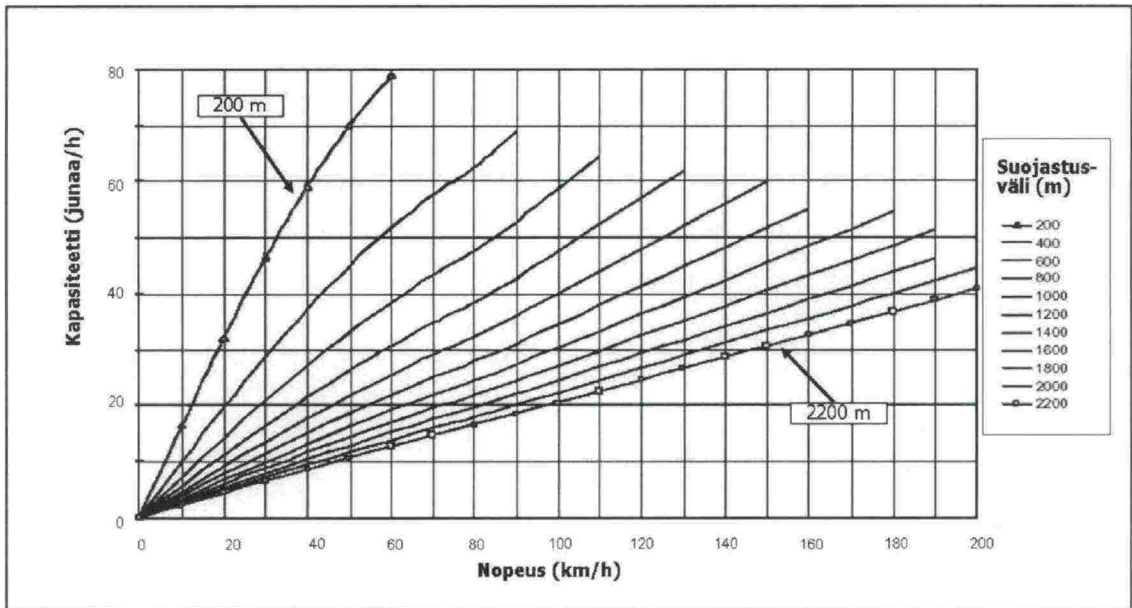
Kuva 5. Varausaikaportaikko (Pachl 2002)

Kuvassa 5 esitetyn kaltaisen yksittäisten varausaikaportaikoiden avulla voidaan edelleen määrittää kahden peräkkäisen junan minimijunavälit tarkasteltavalla rataosalla. Määrittäminen tapahtuu graafisesti piirtämällä molempien junien varausaikaportaikat samaan kuvaan ja tiivistämällä ne mahdollisimman lähelle toisiaan (Kuva 6). Se opastinväli, jossa varausaikaportaikat koskettavat toisiaan tiivistämisen jälkeen, on radan kriittinen opastinväli. Tämä väli määrää koko rataosan minimijunavälin ja edelleen suurimman mahdollisen suoritelmäärän. (Pachl 2002.)



Kuva 6. Junien minimiaikaväli rataosalla ja kriittisellä opastinvälillä (Pachl 2002).

Ruotsissa Banverket on tutkinut simulointimallin avulla opastinvälin pituuden vaikutusta ratakapasiteettiin. Tutkimustuloksena tarkastelusta saatiin määriteltyä kiinteäsuojavälisellä suojastuksella varustetuille rataosille opastinten välisten etäisyyksien vaikutus nopeusrajoituksen ja kapasiteetin väliseen suhteeseen (Kuva 7). (Grimm 2005.)



Kuva 7. Suojastusvälin vaikutus kapasiteettiin (Grimm 2005).

Kuvasta 7 havaitaan, että suojastusvälin lyhentäminen lisää kapasiteettia erityisesti silloin, jos rataosalla on käytössä alhainen nopeusrajoitus (< 80 km/h). On kuitenkin huomioitava, että kuvan 7 kapasiteetti-arvot ovat ideaaliolosuhteissa saatuja teoreettisia arvoja, eikä näin suuriin suoritelmääriin voida koskaan käytännössä päästä. (Grimm 2005.)

Galavernan (1998) mukaan kaksiraiteisilla rataosilla, joissa liikenne on homogeenista, rataosan kapasiteetti tarkasteltavaan suuntaan voidaan laskea yksinkertaistetun kaavan 1 avulla.

$$N = \frac{T}{(t' + t_m)}, \text{ missä} \quad [1]$$

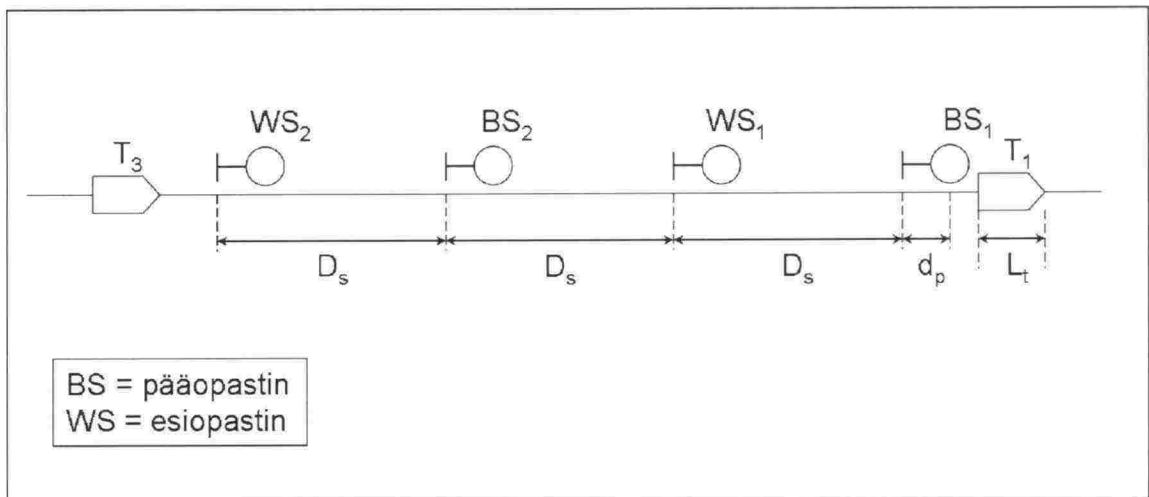
- N = tarkasteltavan suunnan maksimijunamäärä tarkastelujaksolla [kpl]
 T = tarkasteltava ajanjakso
 t' = minimijunaväli
 t_m = liikenteenohjauslaitteiden toimintaan kuluva aika

Kaavasta 1 voidaan pienellä yksinkertaistamisella johtaa kaava 2 kahden peräkkäisen junan minimijunavälin T_0 laskemiseksi sellaisella rataosalla, jossa käytössä ovat sekä pää- että esiopastimet.

$$T_0 = \frac{(3D_s + d_p + L_t)}{v}, \text{ missä} \quad [2]$$

- T_0 = kahden peräkkäisen junan minimijunaväli
 D_s = kahden peräkkäisen pääopastimen väli
 d_p = ohiajovara
 v = junien keskinopeus
 L_t = Junan pituus

edellä olevan kaavan termit on havainnollistettu kuvassa 8.

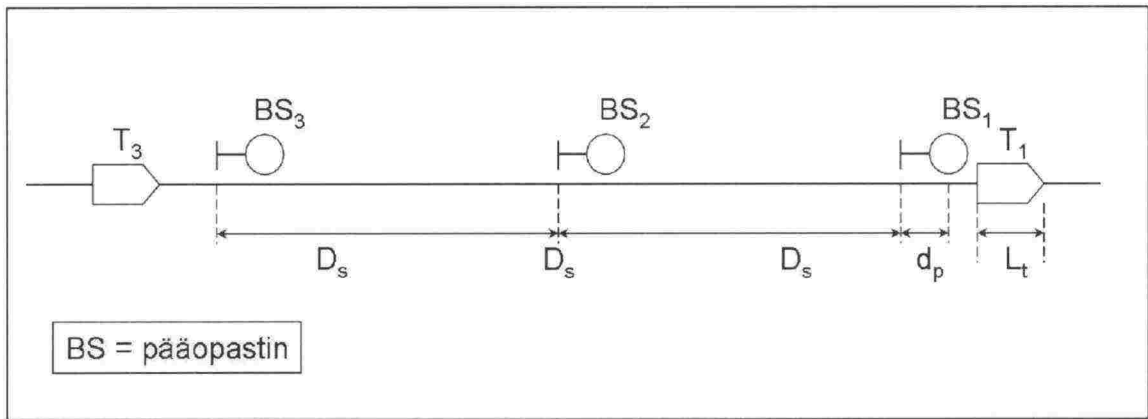


Kuva 8. Kahdella pää- ja kahdella esiopastimella varustettu rataosa (Galaverna 1998.)

Vastaavasti kuvassa 9 esitetynkaltaisen kolmella pääopastimella varustetun rataosan minimijunaväli voidaan laskea kaavalla 3.

$$T_0 = \frac{(2D_s + d_p + L_t)}{v}, \text{ missä} \quad [3]$$

- T_0 = kahden peräkkäisen junan minimijunaväli
 D_s = kahden peräkkäisen pääopastimen väli
 d_p = ohiajovara
 v = junien keskinopeus
 L_t = junan pituus



Kuva 9. Kolmella pääopastimella varustettu rataosa (Galaverna 1998).

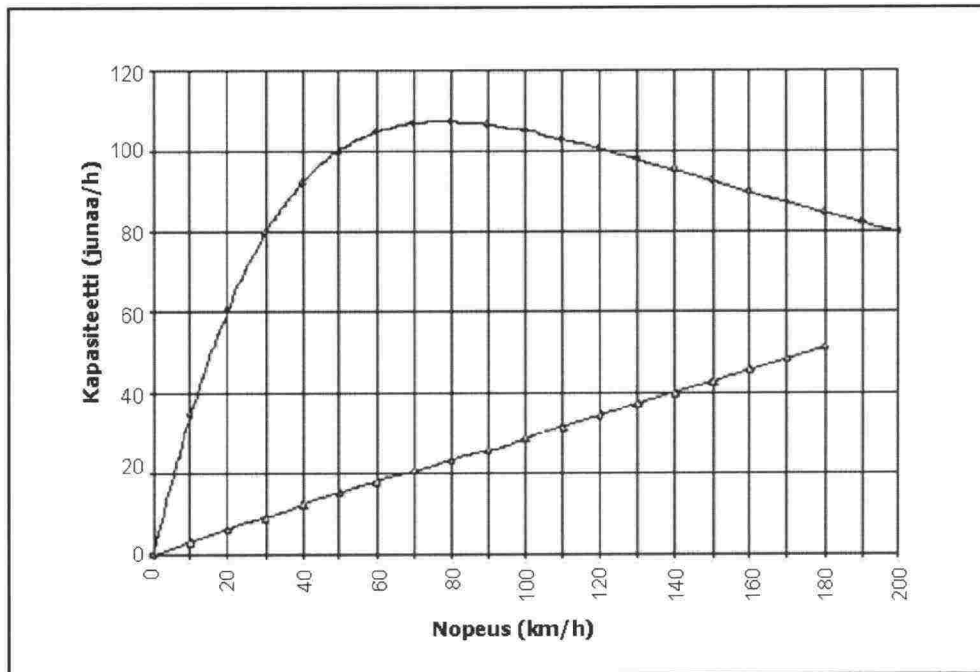
Vastaavin periaattein Galaverna (1998) määrittelee liikkuvalla suojastusvälillä (moving block system) varustetulle rataosalle kaavan 4 kapasiteetin laskemiseksi:

$$T_0 = \frac{v}{2d} + \frac{(d_p + L_t)}{v}, \text{ missä} \quad [4]$$

- T_0 = kahden peräkkäisen junan minimijunaväli
- d_p = ohiajovara
- v = junien keskimääräinen nopeus
- d = junien keskimääräinen hidastuvuus
- L_t = junan pituus

3.2 Kaluston ominaisuudet

Ruotsin rautatieviranomaisen, Banverketin, simulointitutkimuksessa (Grimm 2005) selvitettiin ajonopeuden vaikutusta rataosan kapasiteettiin. Simulointeja eri ajonopeuksilla tehtiin sekä kiinteä- että vaihtuvavälisellä suojastuksella. Banverketin tutkimustulokset on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Kapasiteetin ja ajonopeuden välinen yhteys (ylempi käyrä: vaihtuvavälinen suojastus, alempi käyrä kiinteäsuojavälinen suojastus) (Grimm 2005).

Kuvasta 10 voidaan havaita, että kiinteäsuojavälisellä suojastuksella varustetuilla rataosilla linjakapasiteetti on suoraan verrannollinen junan ajonopeuteen. Vaihtuvavälisellä suojastuksella kapasiteettikäyrä on kuitenkin muodoltaan kaaрева ja saavuttaa maksimiarvonsa kun junien ajonopeus on noin 80 km/h. (Grimm 2005)

Ajonopeuden lisäksi myös muut käytettävän junakaluston ominaisuudet vaikuttavat suoraan tai epäsuorasti radan kapasiteettiin. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa veturin teho, junan paino, kaluston kunto sekä kuljettajan ajotapa. Yksi merkittävimmistä kapasiteettiin vaikuttavista tekijöistä on junan kiihtyvyysominaisuudet, joihin kaikki edellä mainitut tekijät sekä eri vuodenaikojen kulkuvas-tus vaikuttavat. (Junnila 1974.)

Junnila (1974) on tutkimuksessaan selvittänyt eri nopeusrajoitusten ja pituus-kaltevuuksien vaikutusta eripainoisten junien kiihtyvyysominaisuuksiin. Tutki-muksessa kapasiteetin kannalta mielenkiintoista oli havainto siitä, että väliaikai-silla nopeusrajoituksilla voi olla huomattava vaikutus junan ajoaikoihin ja sitä kautta myös kapasiteetin käyttöasteeseen.

Henkilöliikennerradoilla tarvittavien junien määrään ja sitä kautta ratakapasi-teettiin vaikuttavat myös junassa olevien vaunujen sekä niiden matkustuspaikko-jen lukumäärät. Matkustuspaikkoja voidaan lisätä lisäämällä junaan ylimääräisiä vaunuja tai ottamalla käyttöön erikoisvalmisteisia vaunumalleja kuten kaksiker-roksisia tai niin sanottuja leveäkorisia vaunuja. Jälkimmäisten läpileikkaus on

muodoltaan pyöreähkö, minkä ansiosta junaan saadaan ylimääräistä tilaa matkustajia varten. Leveäkorisia vaunuja on kehitetty Japanissa ratkaisemaan taajama-junien kapasiteettipulaa huipputuntien aikana. (Tomii 1999.)

Kallistuvakorisilla junilla, kuten Suomessa käytetyillä Pendolinoilla, voidaan kaarteisiin ajaa suuremmalla nopeudella kuin perinteisillä kallistumattomilla junilla. Kaarteiden suurempi ajonopeus lyhentää ajoaikoja ja radan kapasiteetti kasvaa. (Mäkitalo 2000.)

Junien nopeuksien ja matkustajapaikkamäärän lisäksi myös muut liikkuvan kaluston ominaisuudet vaikuttavat suorasti tai epäsuorasti ratakapasiteettiin. Kuvassa 11 on esitetty karkea yhteenveto näistä ominaisuuksista. (Mäkitalo 2000).

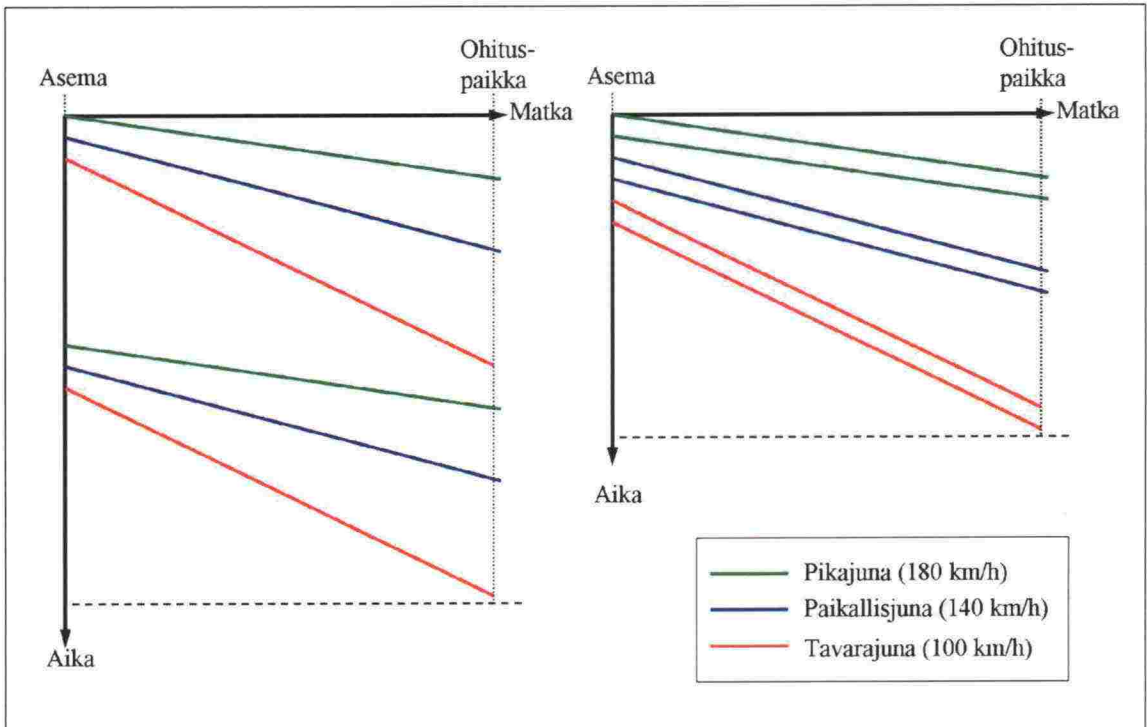


Kuva 11. Liikkuvan kaluston ominaisuuksien vaikutus kapasiteettiin (Mäkitalo 2000).

3.3 Aikataulu

3.3.1 Aikataulurakenteen vaikutus kapasiteettiin

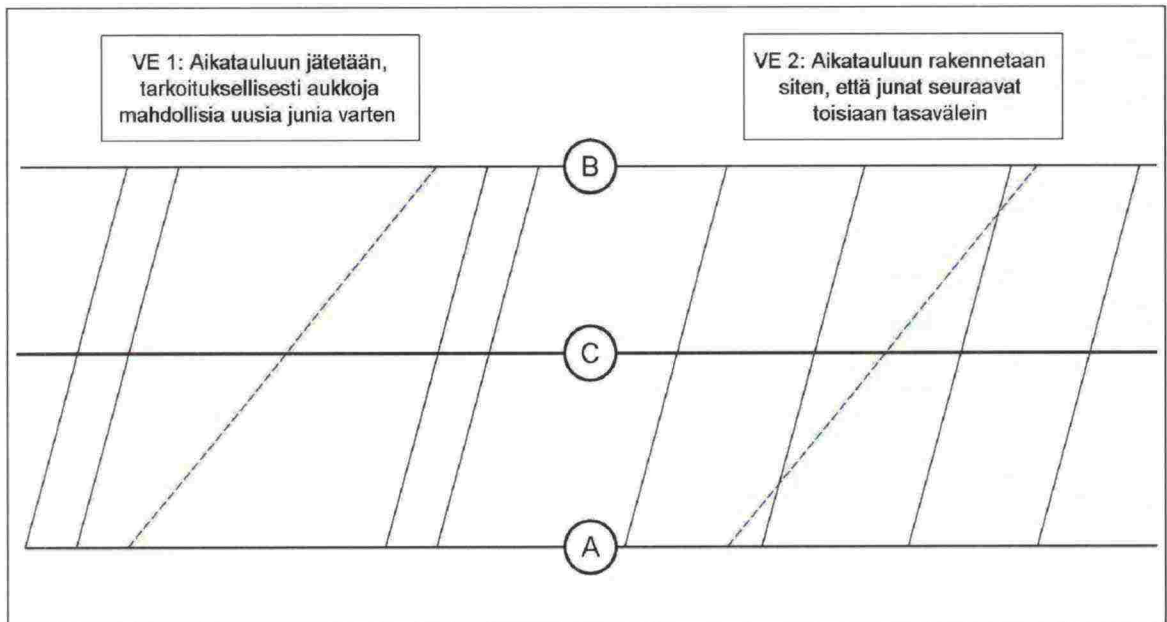
Käytettävällä aikataulurakenteella on suora vaikutus ratasosan kapasiteettiin. Rataparasiteettia saadaan lisättyä ryhmittelemällä samanlaisia junia kulkemaan peräkkäin. Kuvassa 12 on esitetty kaksi vaihtoehtoista tapaa sijoitella kaksi pikajunaa, kaksi paikallisjunaa ja kaksi tavarajunaa kuvitteelliselle ohituspaikkavälille. Oikeanpuoleinen tapaus esittää kapasiteetin kannalta parhaimman ja vasemmanpuoleinen huonoimman junien sijoitteluvaihtoehdon. Oikeanpuoleisin tilanne on infrastruktuurin haltijan kannalta paras vaihtoehto, koska siinä jää eniten kapasiteettia vapaaksi lisäliikennöintiä ja kunnossapitoa varten. Matkustajien ja liikennöitsijöiden toiveet eivät kuitenkaan usein mahdollista tällaisen liikennöinnin toteuttamista. (Kaas 1998.)



Kuva 12. Junien ryhmittelyn vaikutus kapasiteettiin käyttöasteeseen (Kaas 1998).

Kuvasta 12 nähdään, että radan kapasiteettia voidaan kasvattaa ryhmittelemällä nopeudeltaan samankaltaisia junia peräkkäin (Čapek 2005). Teoriassa radan maksimikapasiteetti saavutetaan, jos liikenne radalla on täysin homogeenistä. Metroliikennettä lukuun ottamatta rautatieliikenne on kuitenkin pääsääntöisesti kaikkialla maailmassa heterogeenistä. (Viegas et al. 2003.)

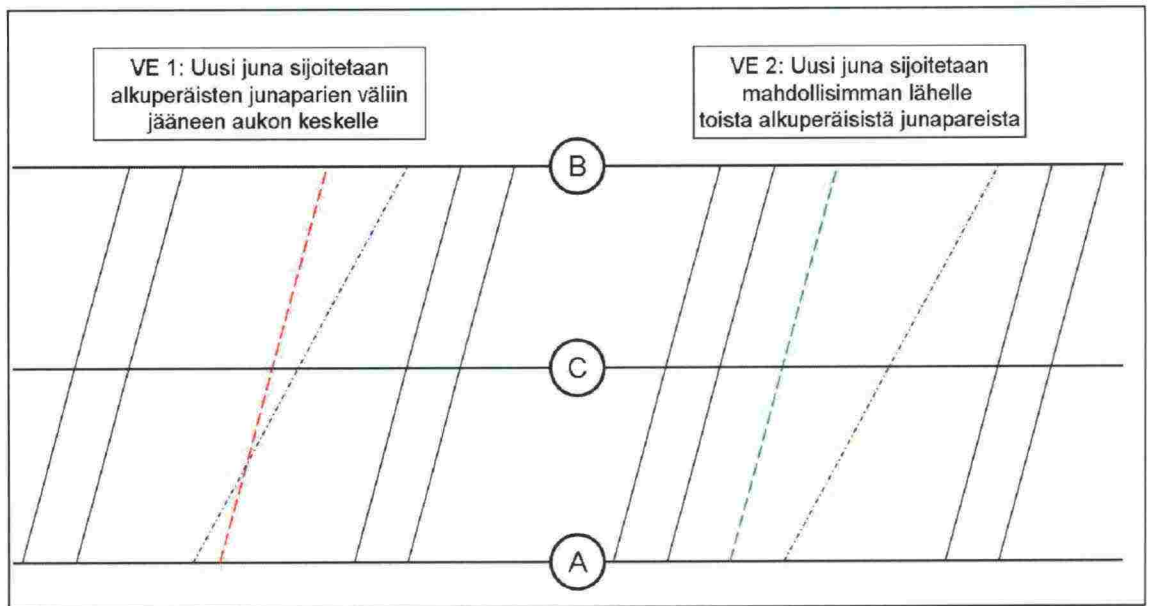
Vaikka markkinoiden kysynnän takia junien ryhmittelyä ei usein voida toteuttaa, ainakaan suuressa mittakaavassa, tulee aikatauluviivojen sijoitteluun kiinnittää paljon huomiota. Oikein sijoitettuna jäljellejäävän kapasiteetin määrää saadaan lisättyä ja lisäjunia saadaan sijoittaa aikatauluun helpommin. Parhaassa tapauksessa aikatauluun jää tilaa aikaisempaa useammalle lisäjunalle. Kuvassa 13 on havainnollistettu junien sijoittamisen merkitystä. Siinä on esitetty kaksi vaihtoehtoista tapaa sijoittaa neljä nopeaa junaa rataosalle, jota rajaavat liikennepaikat A ja B. Kuvaan merkitty kolmas paikka C kuvaa rataosan suojustusväliä. (Čapek 2005.)



Kuva 13. Aikataulurakenteen vaikutus uusien junien lisäämismahdollisuuksiin (Čapek 2005).

Kuvasta 13 nähdään, että vasemman puoleinen vaihtoehto (VE 1) on junien lisäämisen kannalta parempi ja se mahdollistaa suuremman kapasiteetin käyttöasteen rataosalla. Kapasiteetin kannalta junat kannattaakin sijoittaa aikatauluun kahden tai useamman junan ryhmissä, vaikka erityisesti matkustajien näkökulmasta aikataulurakenne, jossa junat liikennöivät tasavuorovälein (VE 2), on usein paras vaihtoehto. (Čapek 2005.)

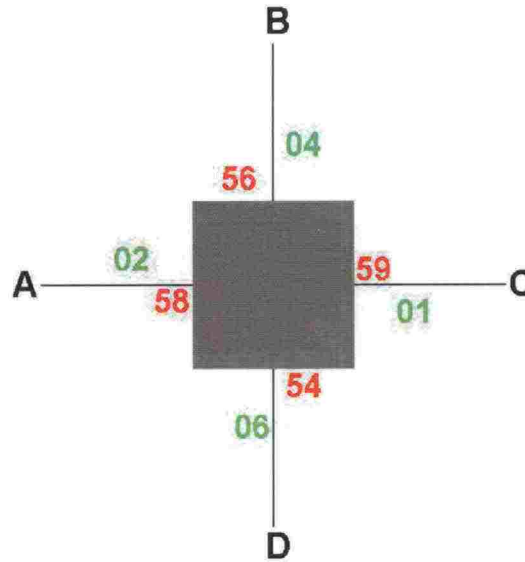
Jotta kapasiteetti tulee käytettyä tehokkaasti hyödyksi, tulee myös lisäjunien sijoitteluun kiinnittää vastaavanlaista huomiota. Uusia junia tulee mahdollisuuksien mukaan sijoittaa aikataulurakenteeseen siten, että aikatauluun jää tilaa vielä mahdollisille uusille lisäyksille (kuva 14). Aina tällainen sijoittelu ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä liikennöitsijän ja heidän asiakkaidensa toiveet eivät kovinkaan usein ole täysin yhteneviä infrastruktuurin haltijan optimitilanteen kanssa. Lisäksi kilpailutuilla markkinoilla kahden tai useamman liikennöitsijän toiveet ovat usein päällekkäisiä, mikä hankaloittaa kapasiteetin jakajan toimintaa entisestään. (Čapek 2005.)



Kuva 14. Vaihtoehtoisia tapoja sijoittaa uusi juna (vasemmassa kuvassa punainen ja oikeassa vihreä katkoviiva) olemassa olevaan aikataulurakenteeseen. (Čapek 2005)

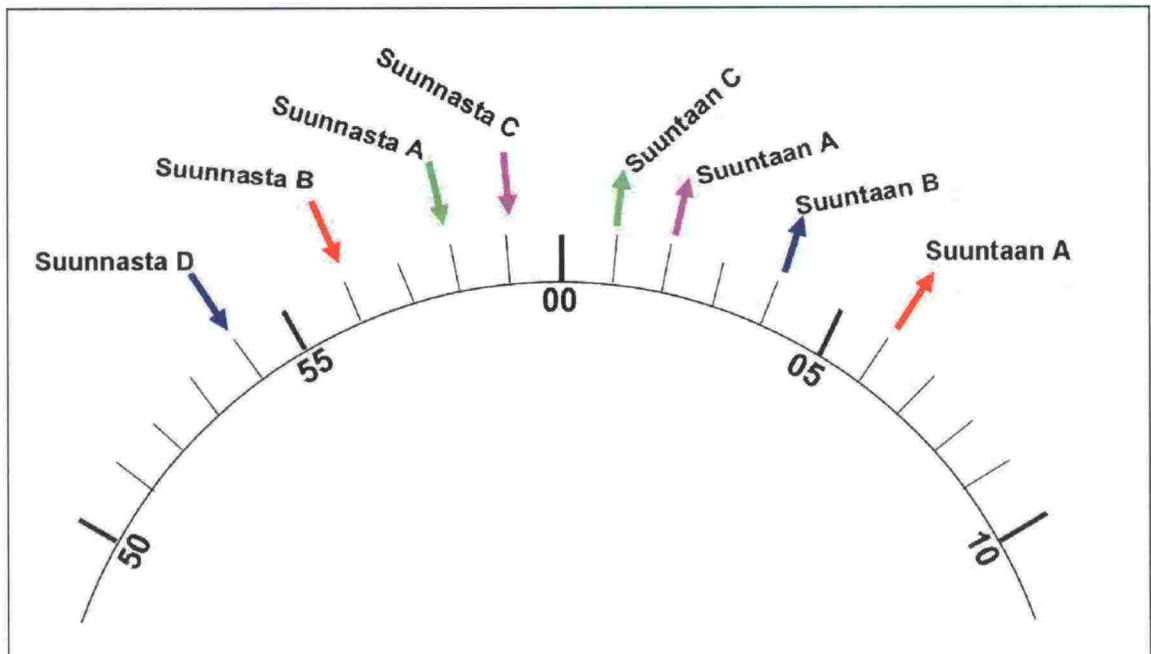
3.3.2 Vakioaikataulu

Vakioaikataululla tarkoitetaan tietyin aikavälein (esimerkiksi kerran tunnissa/puolessa tunnissa) toistuvaa jaksollista aikataulua. Tällöin liikennepaikalta (esim. Tampere) lähtee esimerkiksi etelään vuoro aina samalla minuutilla jaksollisin väliajoin, kerran tunnissa 6 minuuttia yli tasatunnin. Vakioidun lähtöminuutin lisäksi vakioaikataulun periaate edellyttää, että myös saapuville vuoroille on asetettu vastaavat vakioidut saapumisminuutit, esimerkiksi juna Tampereelle etelästä saapuu aina 6 minuuttia ennen tasatuntia. Vakioaikataulun lähtöaikoja liikenteen solmupisteessä on havainnollistettu kuvassa 15. (Mäkitalo 2001 & Pellandini 2001.)



Kuva 15. Vakioaikataulun mukaiset lähtö- ja saapumisajat liikenteen solmupisteessä (Mäkitalo 2001).

Toinen vakioaikataulun ominaispiirre on sen symmetria kellossa tiettyä minuuttilukua vasten. Useimmiten symmetria-akseli muodostuu joko tasatunnin (minuutit 00) tai puolentunnin (minuutit 30) kohdalle. Vakioaikataulun symmetriä kuvan 15 asemalla on havainnollistettu alla olevassa kuvassa 16. (Mäkitalo 2001 & Pellandini 2001.)



Kuva 16. Vakioaikataulun symmetria (Mäkitalo 2001).

Suomen rataverkolle laadittiin ensimmäinen vakiotaulu vuonna 2001. Ensimmäisessä vaiheessa säännöllinen aikataulurakenne tehtiin rataosille Helsinki–

Tampere, Helsinki–Turku, Turku–Tampere ja Riihimäki–Kouvola. (Mäkitalo 2001 & Pellandini 2001.) Toistaiseksi saadut kokemukset sekä matkustajilta saatu palaute ovat olleet erittäin positiivisia ja nopean kaluston lisääntyessä vakioaikataulua on tarkoitus soveltaa myös muilla rataosilla. Suomen rataverkon aikataulut tehdäänkin nykyisin siten, että ensin laaditaan henkilöliikenteen vakioaikataulu, jonka jälkeen aikataulusta etsitään sopivia välejä tavarajunille (Hovi 2005.)

Jäljellä olevan kapasiteetin kannalta on oleellista havaita, että henkilöliikenteen vakioaikataulu edellyttää myös tavaraliikenteen käyttämään vastaavanlaista jaksollista aikataulua. Tavaraliikenteen vakioaikataulun tarve korostuu vilkkaasti liikennöidyillä risteysasemilla, joissa välittömästi ennen ja jälkeen tasatunnin ratakapasiteetin käyttöaste on todella korkea. Jos risteysaseman liikennöintijakson pituus onkin vain puolituntia, korostuu tavaraliikenteen vakioaikataulun tarve entisestään. (Kosonen 2005.)

3.4 Matkustajista aiheutuvat viiveet

Japanissa, missä huipputuntien matkustajamäärät taajamajunissa saattavat olla kaksinkertaisia junien matkustajakapasiteettiin verrattuna, tehdyssä tutkimuksessa (Hirai & Tomii 1998) selvitettiin suurista matkustajamääristä johtuvia viivytyksiä junille. Tutkimuksen mukaan suuret matkustajamäärät voivat aiheuttaa ympäröivälle rataverkolle häiriöitä, jotka vähentävät käytössä olevaa kapasiteettia. Hirai ja Tomii (1998) korostavatkin matkustajamäärätietojen käyttämisen merkitystä aikataulusuunnittelussa ja uskovat, että asiaan tullaan jatkossa kiinnittämään entistä enemmän huomiota.

Vilkkaimpien ruuhkatuntien aikana matkustajista aiheutuvat ylimääräiset odotusajat voivat aiheuttaa tiheästi liikennöidyillä taajamaradoilla merkittäviä kapasiteettiongelmia. Oletetaan, että saapuessaan vilkkaasti liikennöidylle asemalle juna on jo jäänyt hieman jälkeen aikataulustaan. Tällöin aseman jo ennalta suuret matkustajamäärät ovat kasvaneet, mikä puolestaan lisää matkustajista aiheutuvaa viivettä entisestään. Näin ollen lähtiessään liikkeelle juna on myöhästynyt aikataulustaan vielä enemmän, mitä se oli jo saapuessaan asemalle. Vastaavasti käy myös seuraavilla asemilla ja junan viivästymiset kertautuvat moninkertaisiksi. (Tomii 1999.)

Jotta edellä kuvattu tilanne olisi vältettävissä, on Japanin rautateiden teknillinen tutkimusinstituutti RTRI (Railway Technical Research Institute) kehittänyt simulointiohjelman. Sen avulla voidaan ennalta määrittää, kuinka paljon matkustajia on nousemassa lähestyvään junaan, miten matkustajavirrat jakautuvat laiturilla sekä kuinka paljon matkustajia pyrkii sisään ja ulos junan kustakin ovesta. Lähtötietoinaan malli käyttää mm. tietoa asemalle saapuvista matkustajista, li-

punmyyntitietoihin perustuvia lähtö-/määränpaikka -matriiseja sekä paikkatietoja portaiden ja muiden kulkuteiden sijainnista. Lähtötietojen perusteella ohjelma laskee ennustetun ajan, jonka seuraavan asemalle pysähtyvän junan on odotettava laiturissa. (Tomii 1999.)

3.5 Kapasiteetin lisääminen

Jos rataosan välityskyky ei enää riitä nykyiselle tai suunnitellulle liikennöinnille, on kapasiteettia mahdollista lisätä seuraavien neljän eritasoisen toimenpiteen avulla (Pachl 2002):

1. muuttamalla aikataulurakennetta tai liikennöintiperiaatteita
2. poistamalla rataosan hitaita välejä
3. muuttamalla opastinjärjestelyitä
4. muuttamalla ratageometriaa

Taloudellisuuden kannalta toimenpiteet tulisi toteuttaa edellä olevassa järjestyksessä. Ennen konkreettisia investointeja infrastruktuuriin olisi aina hyvä tarkistaa, voidaanko liikennöintiperiaatteita muuttamalla tehostaa kapasiteetin käyttöä riittävästi. Kapasiteetin lisäämisen kannalta merkittävin aikataulutekninen toimenpide on kappaleessa 3.3.1 esitelty junien ryhmittely. Kaksi- tai useampiraiteisilla rataosilla ryhmittely tehdään nopeusluokkien mukaan. Yksiraiteisilla rataosilla junat ryhmitellään suunnittain. Toisin sanoen lisäkapasiteettia saadaan, jos yksiraiteisella radalla ajaa useampia junia peräkkäin samaan suuntaan. (Pachl 2002.)

Vaikka radan välityskyky lisääntyykin junien ryhmittelyn ansiosta, voi toimenpiteellä olla myös negatiivisia vaikutuksia liikennöintiin: odotusajat asemilla ja kohtauspaikoilla voivat kasvaa erityisesti yksiraiteisilla rataosilla, joissa vastaantulevan junan on odotettava yhden junan sijaan useamman junan saapumista. Myös kaksiraiteisilla rataosilla on varmistuttava, että liikennepaikkojen kapasiteetti on riittävä ryhmittelyn takia hetkittäin kasvaneelle kysynnälle. (Pachl 2002.)

Varausaikateorian (ks. kappale 2.1.2) mukaisesti hitaasti ajettavat opastinvälit varaavat kapasiteettia enemmän kuin ne opastinvälit, joissa ajonopeus on suurempi. Jos liikennöintiperiaatteiden muutoksella ei voida vapauttaa kapasiteettia riittävästi, tulisi radalta poistaa kaikki tällaiset hitaat välit ennen suurempia investointeja. Usein tällaisella täsmäinvestoinnilla kapasiteettia saadaankin lisättyä kustannuksiin nähden suhteessa eniten. (Pachl 2002.)

Rataosan kapasiteettia on mahdollista lisätä merkittävästi opastinjärjestelmää parantamalla. Riittävä parannustoimenpide riippuu rataosan nykyisestä opastinjärjestelmästä ja liikenteen kysynnästä. (Pachl 2002):

1. asentamalla opastimet sellaisille ratasoille, jossa on vielä käytössä asemavälisuojustus
2. ottamalla käyttöön kauko-ohjausjärjestelmä
3. lyhentämällä opastinväliä lisäämällä opastimia rataosalle
4. ottamalla käyttöön vaihtuvavälinen suojustus (moving block system)
5. optimoimalla pää- ja esiopastimien sekä niiden vapautuspisteiden sijainnit

Kallein toimenpide kapasiteetin lisäämiseksi on muuttaa radan geometriaa esimerkiksi lisäämällä rataosalle raiteita. Suurien investointikustannuksiensa vuoksi tätä toimenpidettä ei tule tehdä ennen kuin on varmistettu, että mikään edellä esitetyistä toimenpiteistä ei lisää kapasiteettia riittävästi. Raiteiden lisäämisen lisäksi muita ratageometrian muutostöitä kapasiteetin lisäämiseksi ovat erilaisten raideohitusten ja vaihteiden lisääminen sekä risteävien reittien poistaminen uusien ylikulkujen (siltojen) ja alikulkujen (tunnelien) avulla. (Pachl 2002.)

Suomessa otettiin 1990- ja 2000-lukujen vaihteessa käyttöön uusikäsite, täsmäinvestoinnit. Termillä tarkoitetaan suhteellisen edullisia radanrakennustöitä, joiden avulla ratakapasiteettia saadaan lisättyä merkittävästi. Täsmäinvestointeja ovat esimerkiksi uuden kohtauspaikan rakentaminen tai kaksoisraide osuuden lyhyehkö pidentäminen. Tällaiset toimenpiteet saattavat tietyin paikoin toimia ainoastaan lyhyen aikavälin ratkaisuna. Tästä syystä täsmäinvestointeja tulisikin ajatella eräänlaisena ensimmäisen vaiheen ratkaisuna. Esimerkiksi täsmäinvestointeina rakennetut kohtauspaikat kannattaa toteuttaa siten, että niitä voidaan käyttää hyödyksi myöhemmin, jos koko rataosalle päätetään rakentaa lisäraide. (Oksanen 2005.)

4 KÄYTÖSSÄ OLEVIA MENETELMIÄ KAPASITEETIN MITTAAMISEEN

4.1 Yleistä menetelmistä

Seuraavissa kappaleissa esitetyt menetelmät voidaan karkeasti jakaa kahteen ryhmään: kapasiteetin ja kapasiteetin käyttöasteen laskentamenetelmät. Kapasiteettia laskettaessa tutkitaan, kuinka monta junaa voi rataosalla liikennöidä tietyn ajanjakson aikana. Pelkistettynä laskentakaava voidaan esittää seuraavasti:

$$C = \frac{\text{Tarkasteltava ajanjakso}}{X} \quad [5]$$

Osoittajassa esiintyvä X voi kuvata menetelmästä riippuen esimerkiksi peräkäisten junien aikavälien summaa tai se voidaan määrittää esimerkiksi käytettävän turvalaitetekniikan ominaisuuksien tai junien nopeuksien avulla.

Kapasiteetin käyttöaste lasketaan puolestaan liikennöinnin varaaman kokonaisajan ja tarkasteltavan ajanjakson pituuden suhteena:

$$C_{\text{käyttö}} = \frac{\text{Liikennöinnin varaama aika}}{\text{Tarkasteltava ajanjakso}} \cdot 100 \quad [6]$$

Poikkeuksen edellä esitettyyn jakoon tekevät kappaleessa 4.12 esitellyt myöhästymistilastojen analysointimenetelmät.

4.2 Suomessa kapasiteettianalyysiin käytettyjä menetelmiä

4.2.1 Banverketin menetelmä

Vuonna 1999 Ratahallintokeskuksen toimeksiannosta VR-Rata Oy teki selvityksen koko valtion rataverkon kapasiteetin käyttöasteista. Käytetty laskentamenetelmä perustui Ruotsin rautatieviranomaisen Banverketin melko yksinkertaiseen menetelmään, jossa kapasiteetin käyttöaste lasketaan kaavan 7 avulla (RHK 1999):

$$K_{käyttö} = \frac{T}{a \cdot T_{tark}}, \text{ missä} \quad [7]$$

$K_{käyt}$	= kapasiteetin käyttöaste
T	= mitoittavan liikennepaikkavälin kokonaisvarausaika tarkastelujaksolla [h]
a	= korjauskerroin (huipputuntikapasiteettia laskiessa $a = 1$, vuorokausikapasiteettia laskiessa $a = 0,8$)
T_{tark}	= tarkastelujakson laskennallinen pituus (huipputunnin kapasiteettia laskiessa yleensä $T_{tark} = 2$ h, ja vuorokausikapasiteettia laskiessa $T_{tark} = 18$ h. Kuitenkin, jos rataosalla esiintyy huomattavaa yöliikennettä, $T_{tark} = 22$ h,)

Yksiraiteiselle rataosalle varausaika T lasketaan kaavan 8 avulla (RHK 1999 & Wahlborg 2004):

$$T = \sum_{k=1}^n (T_{ajo} + \alpha \cdot (T_{koht} + T_{sam} + T_{kohj})), \text{ missä} \quad [8]$$

T_{ajo}	= junan ajoaika mitoittavalla liikennepaikkavälillä [min]
T_{koht}	= aikalisä, kun junalla on junakohtaus (paikallisjuna 3 min, pikajuna 4 min, nopea juna ja tavarajuna 5 min)
T_{sam}	= aikalisä, kun samanaikainen kohtaustapaikalle tulo ei ole mahdollinen [2 min]
T_{kohj}	= aikalisä, kun radalla ei ole kauko-ohjausta ($T_{kohj} = 1$ min, jos radalla ei ole kauko-ohjausta, muuten $T_{kohj} = 0$ min)
n	= junien lukumäärä tarkasteltavalla ajanjaksolla
k	= junan järjestysnumero
α	= kohtaamisesta aiheutuva korjauskerroin ($\alpha = 1$, jos junalla on kohtaustapaikka, muuten $\alpha = 0$)

Kaksiraiteiselle rataosalle varausaika T lasketaan kaavan 9 perusteella (RHK 1999 & Wahlborg 2004).

$$T = \sum_{k=1}^n (T_{\text{hom}} + T_{\text{konf}} + T_{\text{ohj}}), \text{ missä} \quad [9]$$

T_{hom}	= kahden junan minimiaikaväli homogeenisessa liikenteessä [min]
T_{konf}	= aikalisä, kun junaa seuraa nopeampi juna ($T_{\text{konf}} = T_k - T_{k+1}$, jos $T_{\text{konf}} > 0$, muussa tapauksessa $T_{\text{konf}} = 0$) [min]
T_{ohj}	= aikalisä, kun juna tulee aikataulunmukaisesti ohitetuksi (matkustajajuna 3 min, tavarajuna 5 min)
T_k	= junan k ajoaika mitoittavalla liikennepaikkavälillä
n	= junien lukumäärä tarkasteltavalla ajanjaksolla
k	= junan järjestysnumero

Kaavan 7 perusteella laskettua kapasiteetin käyttöastetta voidaan tulkita seuraavasti (RHK 1999):

0–40 %	rataosalla runsaasti käyttämätöntä kapasiteettia
41–60 %	liikenteen määrä ja laatu ovat tasapainossa
61–80 %	liikenteen kyky palautua häiriötilanteissa on rajoittunut
81–100%	rataosalla on pulaa kapasiteetista

4.2.2 Pääreittiselvitys

Ratahallintokeskuksen tilaamassa vuonna 2004 valmistuneessa pääreittiselvityksessä arvioitiin valtion rataverkon keskeisimpien rataosien, Tampere–Oulu ja Tampere–Pieksamäki, nykytilaa, lähitulevaisuuden parannusehdotuksia sekä uuden aikataulurakenteen (VALI 2006) vaikutusta rataosien liikennöintiin (RHK 2004a). Etelä-Suomen rataverkko, esimerkiksi rataosa Helsinki–Tampere, ei sisällynyt selvitykseen, koska sen liikenteellistä toimivuutta on jo aiemmin arvioitu niin sanotun Triangeli-projektin yhteydessä (RHK 2002a).

Pääreittiselvityksen kapasiteettianalyysi perustuu pitkälti vuonna 2004 käytössä olleen ja suunnitteella olevan VALI 2006 -aikataulun vertailuun. Eräänlaisena kapasiteetin tunnuslukuna selvityksessä käytetään eri junatyypin ajoaikojen muutosprosenttia aikataulurakenteen uudistuessa. (RHK 2004a.)

Työn tulosten perusteella pystyttiin arvioimaan uuden aikataulurakenteen toimivuus ja paikallistamaan rataverkolla olevia kapasiteetin pullonkauloja. Uuden aikataulurakenteen havaittiin pääsääntöisesti lyhentävän henkilöjunien, mutta pidentävän monin paikoin tavarajunien ajoaikoja. Useassa tapauksessa syy tava-

rajunien ajoaikojen pitenemiseen oli kapasiteetin loppuminen tiettyinä ajanjaksoina. (RHK 2004a.)

Pääreittiselvityksen menetelmä oli tekijöittensä mukaan suhteellisen raskas toteuttaa, mutta sillä saadut tulokset on havaittu erittäin käyttökelpoisiksi. Ras- kaaksi menetelmän teki se, että kaikki ajoajat tuli määrittää manuaalisesti. Mene- telmän käytettävyyttä voitaisiin parantaa, jos se saataisiin sisällytettyä esimerkik- si tällä hetkellä Suomessa käytössä olevaan VIRIATO-ohjelmistoon. Parhaiten menetelmä soveltuu kahden, esimerkiksi nykyisen ja suunnitteella olevan, aika- taulurakenteen vertailuun. (Kosonen 2005 & Hovi 2005).

4.3 UIC 406 -laskentamenetelmä

4.3.1 Yleistä menetelmästä

Kansainvälisen rautatieliitto UIC:n (Union Internationale des Chemins de fer) laatima UIC 406: Capacity -julkaisu, määrittelee kapasiteetin ja siihen vaikutta- vat tekijät. Lisäksi julkaisun tavoitteena on esitellä yleispätevä menetelmä, jolla kapasiteetin käyttöaste voitaisiin laskea yhtenevästi kaikkialla maailmassa. (UIC 2004.)

UIC:n määritelmän mukaan kapasiteetti on suhteellinen käsite, eikä sille ole mahdollista määrittää yleispätevää tunnuslukua. Tietyn rataosan toimivuutta ja mahdollisia kapasiteettiongelmia voidaan kuitenkin arvioida suhteellisen yksin- kertaisella kapasiteetin käyttöasteen laskentakaavalla. Kapasiteetin käyttöaste il- moittaa sen osuuden tarkasteltavasta ajasta, joka on varattu liikennöintiin. Toisin sanoen tunnusluvun avulla voidaan määrittää, kuinka monta minuuttia tai tuntia rataosalla on vielä vapaata aikaa mahdollista lisäliikennöintiä varten. (UIC 2004.)

4.3.2 Kapasiteetin käyttöasteen laskeminen

UIC:n menetelmän mukaan kapasiteetin käyttöaste lasketaan kaavalla 10:

$$K = \frac{k \cdot 100}{U}, \text{ missä} \quad [10]$$

K	= kapasiteetin käyttöaste [%]
k	= liikennöinnin varaama kokonaisaika
U	= tarkasteltava ajanjakso

Kaavassa 10 esiintyvä liikennöinnin varaama aika k saadaan laskettua kaavalla 11:

$$k = A + B + C + D, \text{ missä}$$

[11]

- A

= rataosalla liikennöivien junien ajoaikojen summa tarkasteltavan ajanjakson aikana
- B

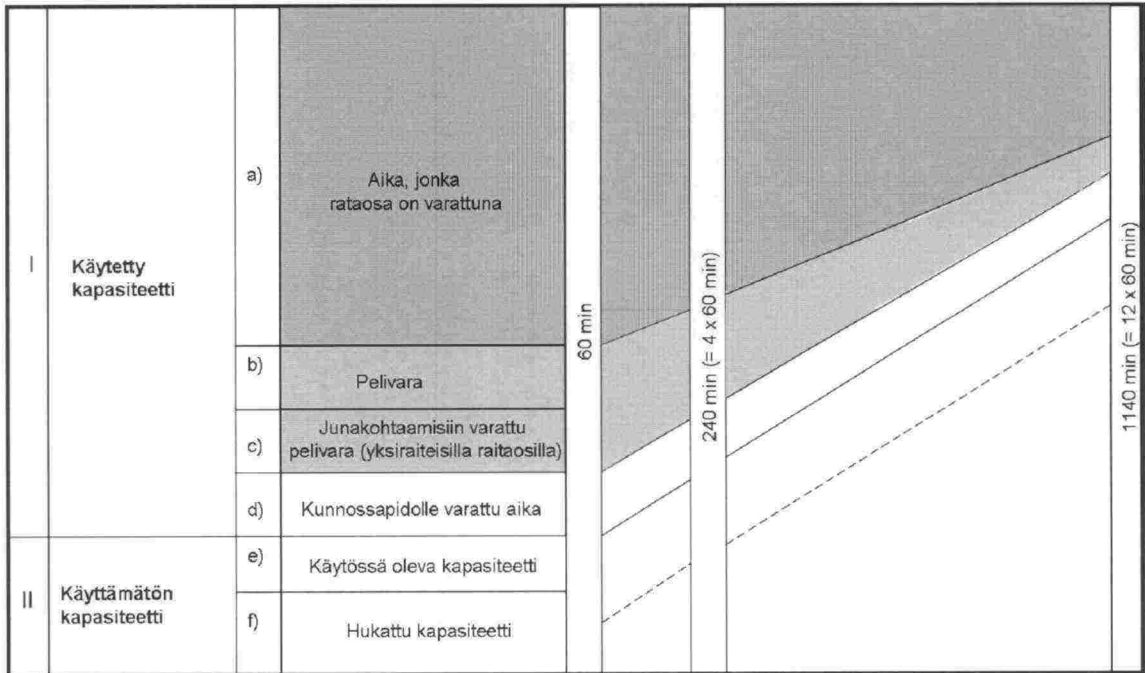
= ajoajan pelivara (min)
- C

= junakohtauksista aiheutuva aikalisä yksiraiteisille rataosille (min)
- D

= kunnossapidolle varattu aika (min)

Kapasiteetin käyttöaste lasketaan sillä oletuksella, että junat lähtevät liikkeille minimiaikavälein. Toisin sanoen aikatauluviivat ikään kuin puristetaan yhteen, ennen kapasiteetin käyttöasteen laskemista (Barter 2004). UIC:n toiveena on, että aikataulujen puristusominaisuus sisällytetään mahdollisimman moniin aikataulun suunnitteluohjelmiin (UIC 406).

Ratakapasiteettia analysoitaessa tulee muistaa liikennemäärien ajalliset vaihtelut (Junnila 1974). UIC:n (2004) menetelmä huomioi tämän korostamalla, että kapasiteetin käyttöaste ja sille määriteltävät raja-arvot riippuvat tarkasteltavasta ajanjaksosta. Kuvassa 17 on esitetty kaavoissa 10 ja 11 esiintyneet termit sekä havainnollistettu kapasiteetin käyttöasteen vähenemistä tarkasteltavan ajanjakson kasvaessa. Vastaavasti myös suurimman sallitun kapasiteetin käyttöasteen raja-arvo vähenee tarkasteltavan aikavälin kasvaessa.



Kuva 17. Kapasiteetin käyttöasteen määrittäminen (UIC 2004).

4.3.3 Kokemuksia UIC-menetelmän käytöstä Ruotsissa ja Itävallassa

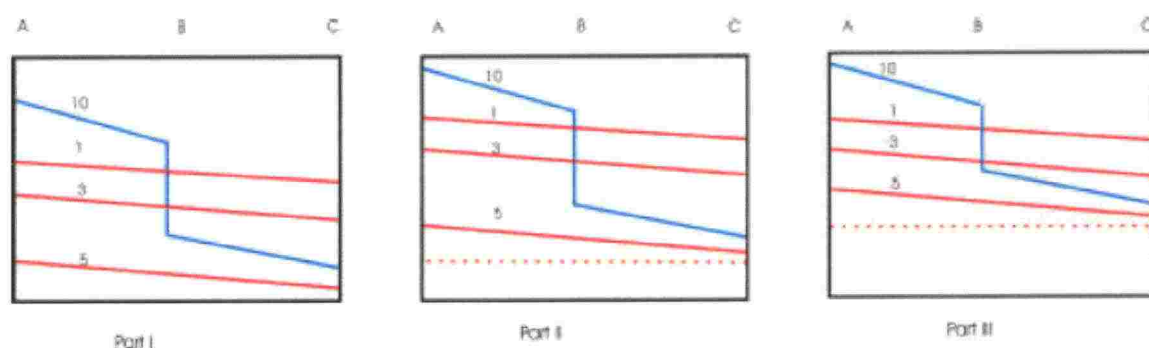
Ruotsin rautatieviranomaisen Banverket on vuosittain laskenut vuodesta 2002 alkaen kapasiteetin käyttöasteet koko Ruotsin rataverkolle. Banverket on ollut myös vahvasti mukana UIC:n määrehtien suunnittelussa ja viimeisimmät ruotsalaiset kapasiteettianalyysit on suoritettu UIC 406 -menetelmän periaatteiden mukaisesti. Banverket on tutkimustuloksina saatujen kapasiteetin käyttöasteiden perusteella luokiteltu Ruotsin rataverkon kolmeen palvelutasoluokkaan (Wahlborg 2005):

- Kapasiteetista on pulaa niillä rataosilla, joissa kapasiteetin käyttöaste on 81–100 %
- Kapasiteetista on ajoittaista pulaa ja ongelmia voi syntyä niillä rataosilla, joissa kapasiteetin käyttöaste on 61–80 %
- Kapasiteetista ei ole pulaa niillä rataosilla, joissa kapasiteetin käyttöaste on pienempi kuin 60 %

Kuvassa 18 on esitetty Ruotsin rataverkon kapasiteetin käyttöasteet karttapohjalla graafisesti esitettyinä. (Wahlborg 2005.)

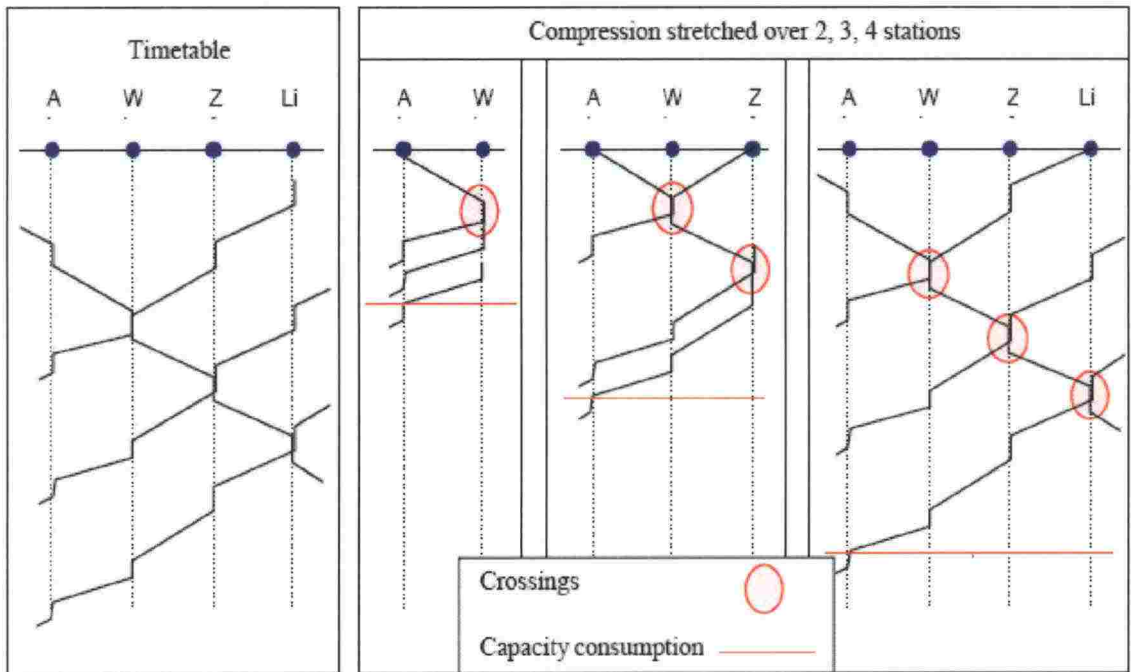
Ruotsin lisäksi myös Itävallassa UIC 406 -menetelmä on otettu käyttöön kapasiteettitarkasteluissa. Kokemukset ovat olleet pääsääntöisesti erittäin positiivisia, mutta aikataulujen puristamistyövaiheen on havaittu olevan ennakkokäsitystä monimutkaisempi. (Höllmüller & Klahn 2005.)

Aikataulun puristaminen tehdään Itävallassa tietokoneavusteisesti. Analyysin suorittajalta vaaditaan kuitenkin myös omaa asiantuntemusta erityisesti sellaisilla rataosilla, joilla on paljon ohituksia tai junakohtaamisia. Kuvassa 19 on havainnollistettu aikataulun tiivistämistä sellaisessa tilanteessa, jossa kaksi nopeampaa junaa ohittaa hitaamman junan, jota seuraa vielä kolmas nopea juna. Vasemmanpuoleisimmassa kuvassa on esitetty tiivistämätön tilanne, keskimmäisessä tiivistetty tilanne, ja oikeanpuoleisimmassa kuvassa lopullinen tiivistys, jossa myös hitaamman junan odotusaikaa on lyhennetty. Useat käytössä olleet tietokoneohjelmat tiivistävät kuvassa esitetyn tilanteen ainoastaan keskimmäiseen vaiheeseen. (Höllmüller & Klahn 2005.)



Kuva 19. Aikataulun puristaminen sellaisella rataosalla, jossa hitaampi juna ohitetaan (Höllmüller & Klahn 2005)

Toinen asia mikä on Itävallassa tullut esille UIC 406 -menetelmää käyttöönottaessa, on tarkasteltavan rataosan pituuden vaikutus kapasiteetin käyttöasteeseen. Kuvassa 20 on vasemmalla puolella esitetty graafinen aikataulu yksiraiteiselta rataosalta, jolla on neljä liikennepaikkaa. Sen oikealla puolella on esitetty kolme erilaista tulosta aikataulun tiivistämisestä. Ero kapasiteetin käyttöasteissa riippuu siitä tarkastellaanko yhtä, kahta vai kolmea liikennepaikkaväliä. (Höllmüller & Klahn 2005.)



Kuva 20. Aikataulun puristaminen yksiraiteisella rataosalla (Höllmüller & Klahn 2005).

4.3.4 UIC 405 -menetelmä

Ennen vuonna 2004 julkaistua UIC 406: Capacity -määrelehteä, jossa edellisessä kappaleessa kuvattu kapasiteetin käyttöasteen laskentaperiaate on ensimmäistä kertaa esitelty, oli kansainvälinen rautatieliitto julkaissut UIC 405 -määrelehden, jossa esiteltiin toisenlainen menetelmä rataosan kapasiteettianalyysiin. (Viegas et al. 2003.)

Merkittävin ero UIC 405 ja 406 -menetelmien välillä on se, että toisin kuin uudempi teoria (UIC 406) UIC 405 -menetelmän mukaan tarkasteltavalle rataosalle on mahdollista laskea maksimikapasiteetti, jonka yksikkö on suurin mahdollinen junamäärä tarkasteltavana ajanjaksona. Teorian mukaan rataosan kapasiteetti saadaan laskettua kaavalla 12. (Viegas et al. 2003.)

$$L = \frac{T}{(t_{fm} + t_r + t_{zu})}, \text{ missä} \quad [12]$$

- L = rataosan kapasiteetti tarkasteltavalla ajanjaksolla [juna]
- T = tarkasteltava ajanjakso [min]
- t_{fm} = keskimääräinen minimijunaväli [min/juna]
- t_r = ajoaikojen pelivara [min/juna]
- t_{zu} = lisäaika [min/juna]

Kaavassa 12 esiintyvä junien keskimääräinen minimijunaväli, t_{fm} , saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$t_{fm} = \frac{\sum (n_{ij} \cdot t_{fij})}{\sum n_{ij}}, \text{ missä} \quad [13]$$

n_{ij} = niiden tapausten lukumäärä, joissa samaan suuntaan ajava juna j seuraa junaa i^{*)}

t_{fij} = junien j ja i minimijunaväli tapauksissa, joissa juna j seuraa junaa i^{*)}

^{*)} i ja j edustavat erilaisia radalla liikennöiviä junatyyppejä

UIC:n 405 -teorian mukainen laskentamenetelmä esiteltiin kansainvälisen rautatieliiton toimesta jo vuonna 1979. Jo tällöin tavoitteena oli yhdenmukaistaa kapasiteetilaskennan periaatteet Euroopassa. Varsinainen kapasiteetin laskenta-kaava on identtinen edellä esitetyn kaavan 12 kanssa, mutta keskimääräisen minimijunavälin kaava eroaa UIC:n 405:n kaavasta siten, että se ottaa erilaisten junatyyppien lisäksi huomioon junien kulkusuunnan. Kaava soveltuu täten paremmin myös yksiraiteisten rataosien kapasiteettitarkasteluihin. Vuonna 1979 esitellyssä menetelmässä keskimääräinen minimijunaväli saadaan laskettua kaavan 14 avulla. (Ronni 1994.)

$$t_{fm} = \frac{\sum (n_{ij(aa)} t_{fij(aa)}) + \sum (n_{ij(ab)} t_{fij(ab)}) + \sum (n_{ij(bb)} t_{fij(bb)}) + \sum (n_{ij(ba)} t_{fij(ba)})}{\sum n_{ij}}, \text{ missä} \quad [14]$$

n_{ij} = aikavälien lukumäärä

t_{fij} = minimijunaväli, tilanteessa jossa juna j seuraa junaa i

Kaavassa 14 esiintyvät alaindeksit a ja b kuvaavat peräkkäisten junien kulkusuuntaa. aa-indeksi kertoo, että asemalta a lähtenyt juna seuraa samalta asemalta a lähtenyt juna. Vastaavasti alaindeksi ab kuvaa tilannetta, jossa asemalta a lähtenyt juna seuraa vastakkaiseen suuntaan kulkeva asemalta b lähtenyt juna. (Ronni 1994.)

UIC:n vuonna 1979 esittelemän teorian mukaan kapasiteetin laskukaavassa 12 esiintyvällä pelivaralla t_r varmistetaan junien täsmällisyys ja parannetaan koko rataverkon kykyä palautua mahdollisesta häiriöstä. Tämän ylimääräisen aikalisän suuruudeksi on kokemukseräisesti määritetty 67 prosenttia keskimääräisestä minimijunavälistä ($t_r = 0,67 \cdot t_{fm}$). Huipputunnin liikennettä tarkasteltaessa voidaan

kuitenkin hyväksyä pienempikin pelivara. Tällöin pelivarana käytetään 33 prosenttia keskimääräisestä minimijunavälistä ($t_r = 0,33 \cdot t_{fm}$). (Ronni 1994.)

Toinen kaavassa esiintyvä lisäaikatermi t_{zu} on lisätty parantamaan rataosan palvelutasoa ja varmistamaan junakohtausten onnistuminen. Junakohtausten varmuustekijän suuruus voidaan määrittää seuraavasti (Ronni 1994):

$$t_{zu} = 0,25 \cdot a, \text{ missä} \quad [15]$$

a = kohtauspaikkavälien lukumäärä

UIC:n vuoden 1979 teoriassa on myös määritelty yksityiskohtaisesti menetelmät sekä samaan että eri suuntaan ajavien junien minimiaikavälien (t_{fij}) laske- miseksi. Koska UIC on myöhemmin tehnyt uusia, myös tässä työssä esiteltyjä, ratakapasiteetin laskuohjeita, ei ole tarkoituksen mukaista esitellä näitä menetel- miä sen tarkemmin. Yksityiskohtaisemmin menetelmää on kuvannut ainakin Ronni (1994).

Norjalainen Skartsæterhagen muokkasi UIC:n vuonna 1979 laatimaa teoriaa soveltumaan paremmin paikallisiin olosuhteisiin. Tässä sovelluksessa on huomi- oitu sellaisen tilanteen mahdollisuus, jossa kaksi junaa saapuu samanaikaisesti kohtauspaikalle. Yhtäaikainen kohtauspaikalle saapuminen pienentää kohtaami- sen vaativaa aikaa t_k , jolloin kapasiteettia saadaan hieman vapautettua. Norjalai- nen teoria pitää sisällään muutamia yleistyksiä, jotka eivät täysin kuvaa todellista liikennöintiä. Teoria olettaa, että peräkkäisten asemien ajoaika on molempiin suuntiin sama ($t_{11} = t_{12}$), ja että junia kulkee vastakkaisiin suuntiin vuoron perään. Lisäksi kaikki asemat oletetaan samanlaisiksi, ja että juna 1 ajaa joka toisella kohtauspaikalla ensimmäisenä väistöraiteelle. Vielä kun hyväksytään oletus siitä, että $t_a = 0$ joka toisessa kohtaamisessa, saadaan minimijunaväli laskettua kaavan 16 avulla. (Ronni 1994.)

$$t_f = 0,5 \cdot (t_{(ab)} + t_{(ba)}) = 0,5 \cdot ((t_{11} + 0,5 \cdot t_{bk}) + (t_{12} + 0,5 \cdot t_{bk})) = t_{11} + 0,5 \cdot t_{bk}, \text{ missä} [16]$$

t_f = minimijunaväli

$t_{(ab)}$ = junaväli tilanteessa, jossa suuntaan b ajava juna seuraa suuntaan a (vastakkaiseen suuntaan) ajavaa junaa

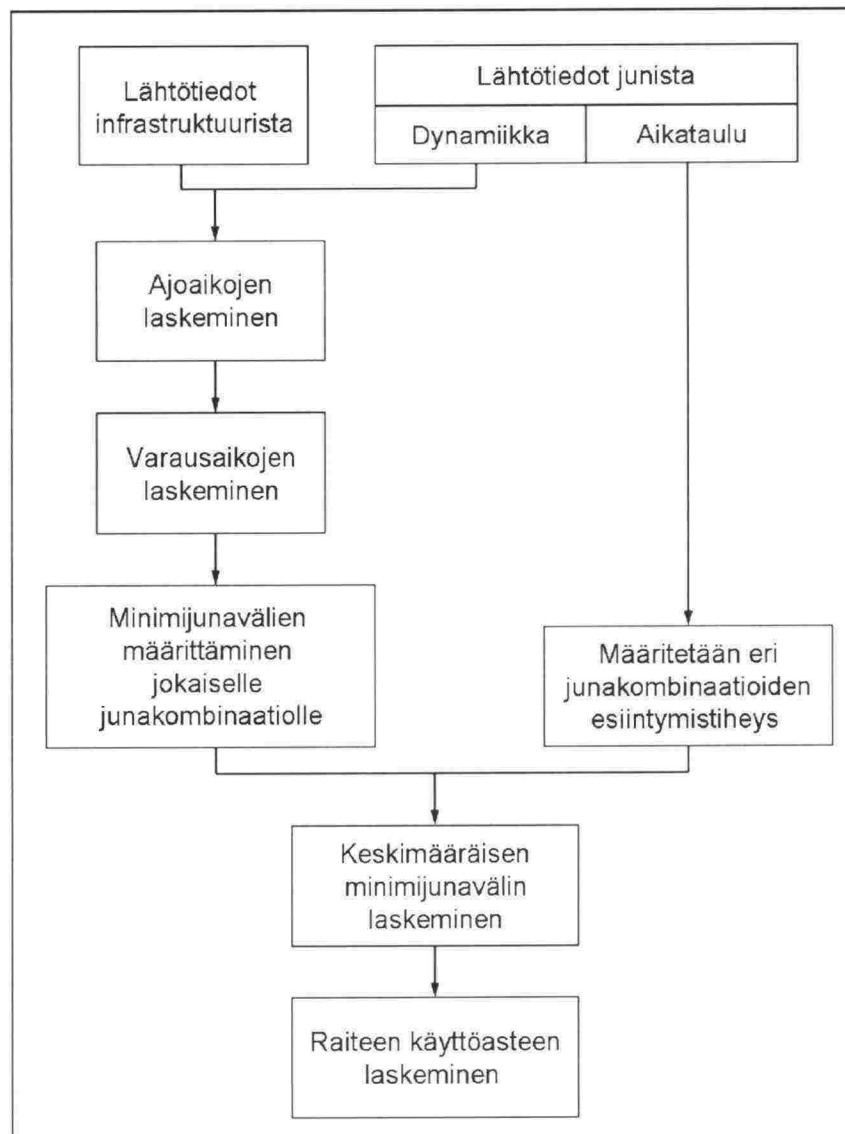
$t_{(ba)}$ = junaväli tilanteessa, jossa suuntaan a ajava juna seuraa suuntaan b (vastakkaiseen suuntaan) ajavaa junaa

t_{11}, t_{12} = suojastusväliin kuluva ajoaika

t_{bk} = junakohtaamiseen kuluva aika asemalla a

4.4 Saksalaisia menetelmiä kapasiteettianalyysiin (Pachl 2002)

Pachlin (2002) mukaan analyyttisten menetelmien käyttö välityskykylaskennoissa on usein perusteltua niiden taloudellisuuden ja helppokäyttöisyyden vuoksi. Vaikka analyttiset menetelmät eivät annakaan aivan yhtä tarkkoja tuloksia kuin simulointiohjelmat, päästään niillä kuitenkin usein päätöksenteon kannalta riittävään tarkkuuteen. Myös simulointimallien rakentamista voidaan monessa tapauksessa nopeuttaa yhdellä tai useammalla analyttisellä mallilla, jonka avulla mallinnettavasta ympäristöstä tehdään yksinkertaisempi. Pachl (2002) korostaa, että kapasiteettilaskenta on monivaiheinen prosessi, jossa eri osavaiheet voidaan laskea erilaisilla menetelmillä. Kapasiteettilaskenta ja sen osavaiheet on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Kapasiteettianalyysin osavaiheet (Pachl 2002).

Kapasiteettianalyysin ensimmäinen vaihe on määrittää radan infrastruktuuri- ja junatietojen perusteella opastinvälien pituudet sekä niitä vastaavat ajoajat kullekin radalla liikennöivälle junatyypille. Näiden tietojen perusteella voidaan laskea opastinväille varausajat (ks. kappale 3.1.2). Varausaikojen laskeminen kuitenkin edellyttää, että käytettävissä ovat seuraavat lähtötiedot:

1. opastimien sijainti rataosalla
2. opastimien vapauttamispisteiden sijainnit
3. asetinlaitteiden vapautuspisteiden sijainnit
4. aika, joka kuluu opastimen vapauttamiseen ja kauko-ohjattujen reittien asettamiseen
5. aika, joka kuluu reittien vapauttamiseen
6. junien pituudet

Kuten luvussa 3.1.2 on todettu, opastinvälien varausaikojen perusteella on mahdollista määrittää rataosan minimijunavälit jokaiselle junakombinaatiolle. Tässä yhteydessä junakombinaatioilla tarkoitetaan kahden peräkkäisen, samaan suuntaan ajavan junatyypin eri yhdistelmiä. Yksittäisten minimijunavälien avulla voidaan seuraavassa osavaiheessa määrittää rataosan keskimääräinen minimijunaväli (kaava 17).

$$t_h = \sum (t_{h,ij} \cdot f_{ij}), \text{ missä} \quad [17]$$

- t_h = tarkasteltavan rataosan keskimääräinen minimijunaväli
 $t_{h,ij}$ = junatyypin j minimijunaväli tilanteissa, joissa edellä ajaa junatyyppi i
 f_{ij} = eri junakombinaatioiden (tilanteiden, joissa juna j seuraa juna i) suhteellinen frekvenssi

Jos rataosan aikataulua ei tiedetä, voidaan kaavassa 17 esiintyvälle suhteelliselle frekvenssille f_{ij} laskea likiarvo kaavan 18 avulla:

$$f_{ij} = \frac{(n_i \cdot n_j)}{n^2}, \text{ missä} \quad [18]$$

- n_i = junien i lukumäärä
 n_j = junien j lukumäärä
 n = rataosalla liikennöivien junien kokonaislukumäärä

Pachlin (2002) mukaan yksittäisen opastinvälin käyttöaste voidaan laskea tarkasteltavan ajanjakson kaikkien junien varaamisaikojen summan ja koko ajanjakson pituuden osamääränä. Tarkasteltavan raiteen käyttöaste voidaan puolestaan laskea kertomalla ensin keskimääräisen minimijunaväli tarkasteltavan ajanjakson junamäärällä ja jakamalla tämä tulo tarkasteltavan ajanjakson pituudella (kaava 19).

$$\eta = \frac{n \cdot t_h}{t_p}, \text{ missä} \quad [19]$$

η	= tarkasteltavan raiteen käyttöaste
n	= junien kokonaislukumäärä
t_h	= junien keskimääräinen minimijunaväli rataosalla
t_p	= tarkasteltavan ajanjakson pituus

Kapasiteetin käyttöasteella on suora vaikutus rataosan liikenteen laatuun. Jotta kaksiraiteisella sekaliikenne-radalla liikenteen palvelutaso pysyisi vähintään välttävällä tasolla, kapasiteetin käyttöasteen vuorokausiarvo ($t_p = 24$ h) ei saisi Pachlin (2002) mukaan ylittää 50 prosenttia. Vastaavasti liikenteen huipputuntien aikaan kapasiteetin käyttöaste ei saisi ylittää 80 prosenttia. Yksiraiteisilla rataosilla, joissa kohtaamispaikkavälien etäisyydet ovat suuria, voidaan hyväksyä jonkin verran suurempia raja-arvoja. Vastaavasti kapasiteetin käyttöasteen raja-arvoille voidaan hyväksyä hieman edellä olevia suurempia arvoja myös sellaisilla kaksiraiteisilla rataosilla, joissa eri junatyypin nopeuserot ovat suuria.

4.5 Portugalilaiset CAP 1 ja CAP 2 -mallit (Moreira et al. 2003)

CAP 1 ja CAP 2 -mallit pohjautuvat Sveitsin valtionrautateiden (SBB) kehittämään CAPACITY-mallin (ks. kappale 4.6), jonka tavoin CAP 1 ja 2 -mallien tavoitteena on ottaa huomioon infrastruktuurin ominaispiirteet, ympäröivä rataverkko sekä mahdollisuus arvioida junatyypijakaumaa ilman olemassa olevaa aikataulua. Jotta nämä tavoitteet täyttyisivät, mallin kehittäjät päättivät muodostaa kaksi osamallia yhden kaikenkattavan mallin sijaan.

Osamalleista CAP 1 on suunniteltu kaksi- tai useampiraiteisen rataosien välityskyvyn arviointiin. Malliin on tehty oletus, että kaksi- tai useampiraiteisella radalla yhdellä radalla liikennöidään vain toiseen suuntaan. Tämän oletuksen perusteella yhden raiteen kapasiteetti voidaan laskea suhteellisen yksinkertaisen kaavan (20) avulla:

$$L = \frac{T}{t_{fm}} \cdot C_{ut}, \text{ missä} \quad [20]$$

- L = tarkasteltavan raiteen kapasiteetti ajanjaksolla T [juna]
 T = tarkasteltavan ajanjakson pituus [min]
 t_{fm} = junien keskimääräinen aikaväli tarkasteltavalla raiteella [min/juna]
 C_{ut} = suurin sallittu kapasiteetin käyttöaste [%]

Junien keskimääräinen aikaväli t_{fm} voidaan laskea kaikkien mahdollisten aikavälitapausten painotettuna keskiarvona:

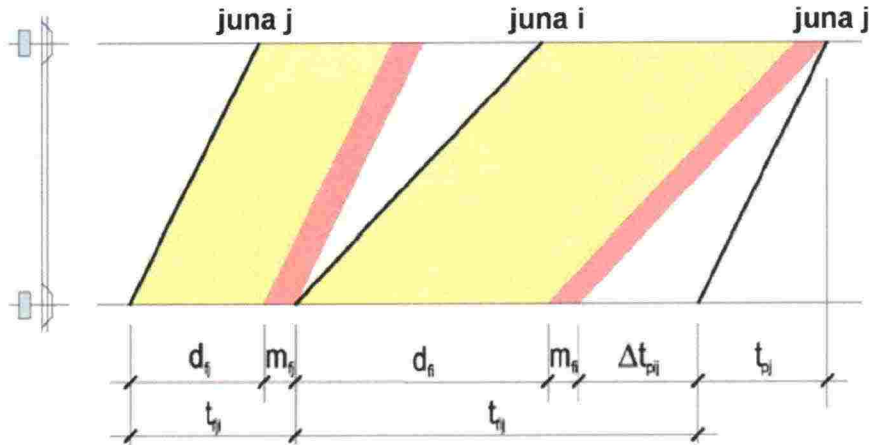
$$t_{fm} = \sum_i \sum_j \left(\frac{t_{fij} \cdot n_{ij}}{N} \right), \text{ missä} \quad [21]$$

- t_{fij} = junaväli tapauksissa, joissa juna j seuraa juna i (min)
 n_{ij} = niiden tapausten, joissa juna j seuraa juna i , odotettu lukumäärä
 N = junien kokonaismäärä tarkasteltavalla ajanjaksolla

Junien j ja i välinen junaväli t_{fij} riippuu tarkasteltavan rataosan pituudesta, junien ajoajoista sekä ajoaikoihin lisättävästä lisääjasta, jolla aikataulusta tehdään vakaampi. Tämä junaväli voidaan määrittää kaavalla 22, jossa esiintyvät termit on havainnollistettu kuvassa 22.

$$t_{fij} \left[\frac{\min}{sillon} \right] = \text{Min}\{d_{fi}; t_{pi}\} + m_{fi} + \text{Max}\{t_{pi} - t_{pj}; 0\}, \text{ missä} \quad [22]$$

- t_{pi} = junan i ajoaika
 d_{fi} = minimijunaväli
 m_{fi} = ajoajan pelivara



Kuva 22. Samaan suuntaan, mutta eri nopeudella ajavien junien sijoittelua tarkasteltavalla rataosalla (Moreira et al. 2003).

Kaavassa 21 esiintyvälle sellaisten tapausten, joissa juna j seuraa junaa i, odotettu lukumäärä voidaan laskea kaavalla 23.

$$n_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{N}, \text{ missä} \quad [23]$$

- n_{ij} = odotettu lukumäärä niille tapausten, joissa juna j seuraa junaa i
 n_i = junien i lukumäärä
 n_j = junien j lukumäärä
 N = junien kokonaismäärä $\left(N = \sum_i n_i \right)$

Kun junien keskimääräinen aikaväli t_{fm} ja tarkastelujakson kokonaisjunamäärä ovat tiedossa, voidaan selvittää kuinka paljon rataosalla on vapaata kapasiteettia huolto- ja kunnossapitotöille.

$$P_0 = T - t_{fm} \cdot N, \text{ missä} \quad [24]$$

- P_0 = Huolto- ja kunnossapitotöille vapaana oleva kapasiteetti
 T = Tarkasteltava ajanjakso
 t_{fm} = junien keskimääräinen aikaväli tarkasteltavalla raiteella
 N = junien kokonaismäärä tarkasteltavalla ajanjaksolla

Lisäksi vapaana oleva kapasiteetti junatyypeittäin voidaan laskea kaavan 25 perusteella.

$$L(\delta_k) = \sum_i n_i \left\{ \begin{array}{l} n_i = n'_i + \delta_k, \text{ kun } i = k \\ n_i = n'_i, \text{ kun } i \neq k \end{array} \right\}, \text{ missä} \quad [25]$$

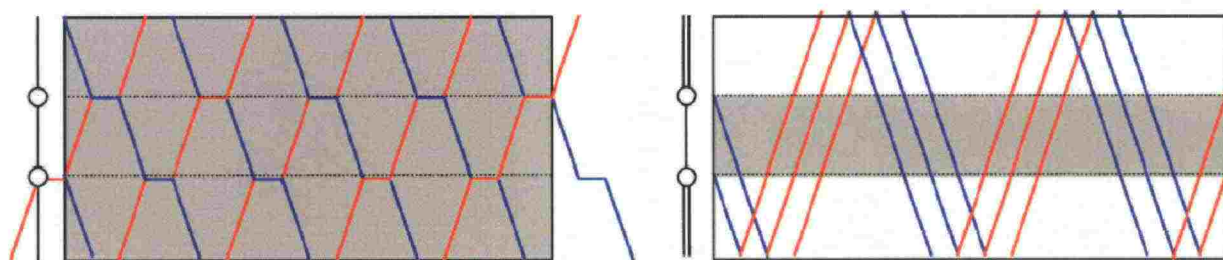
- $L(\delta_k)$ = rataosan kapasiteetti δ_k :n funktiona [junaa]
 n'_i = rataosalla liikennöivien i -tyypin junien lukumäärä [junaa]
 δ_k = vapaana oleva kapasiteetti junatyypille k [k -tyypin junaa]
 n_i = junien i kokonaismäärä, joka voisi liikennöidä rataosalla

Kaavasta 25 voidaan edelleen johtaa laskukaava vapaalle kapasiteetille junatyypeittäin:

$$\delta_k = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot t_{fkk} \cdot \left(\sum_i \sum_j n'_i \cdot n'_j \cdot t_{fij} - T \cdot C_{ut} \cdot \sum_i n'_i \right)}}{2 \cdot t_{fkk}}, \text{ missä} \quad [26]$$

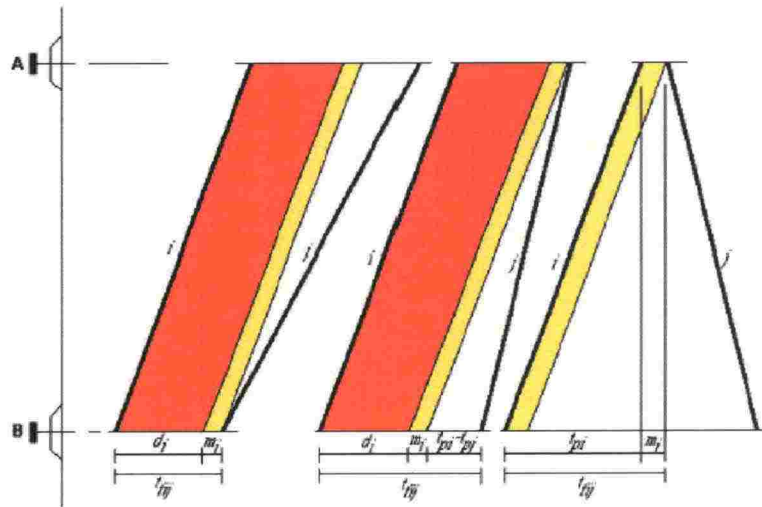
$$b = \left(T \cdot C_{ut} - \sum_i (t_{fik} + t_{fki}) \cdot n'_i \right) \quad [27]$$

Toinen osamalli CAP 2 perustuu vastaaviin periaatteisiin kuin edellä esitetty CAP 1 -malli, mutta CAP 2 -malli soveltuu yksiraiteisten rataosien kapasiteetin laskentaan. CAP 2 -mallilla voidaan arvioida myös esimerkiksi yksiraiteisen tunnelin vaikutusta rataosan kapasiteettiin (kuva 23).



Kuva 23. Esimerkkejä tilanteista, joihin CAP 2-malli soveltuu; vasemmalla yksiraiteinen rataosa, oikealla kaksiraiteinen rataosa, jonka välissä yksiraiteinen tunneli (Moreira et al. 2003).

Toisin kuin laskettaessa kaksi- tai useampiraiteisten ratojen välityskykyä yksiraiteisissa tapauksissa on kiinnitettävä huomiota peräkkäisten junien kulkusuuntiin. Kuvassa 24 on esitetty kolme erilaista tilannetta siitä, miten kaksi peräkkäistä junaa voi liikennöidä yksiraiteisella rataosalla. Lisäksi kuvassa on esitetty CAP 2 -mallin laskukaavoissa käytetyt termit kullekin tilanteelle.



Kuva 24. Aikavälien määrittäminen kolmessa eri tilanteessa (1. hidas juna seuraa nopeampaa, 2. nopea juna seuraa hitaampaa, 3. vastakkaisiin suuntiin kulkevat junat) (Moreira et al. 2003).

Kuten edellä CAP 1 -mallin tapauksessa myös CAP 2:n laskenta alkaa kahden peräkkäisen rataosalle saapuvan junan aikavälin määrittämisestä. Aikaväli voidaan laskea kaavoilla 28 ja 29. Näistä ensimmäistä käytetään, jos peräkkäiset junat i ja j kulkevat samaan suuntaan ja jälkimmäistä, jos junat kulkevat vastakkaisiin suuntiin.

$$t_{fij} \left[\frac{\min}{juna} \right] = \text{Min}\{d_{fr}; t_{pi}\} + m_{fi} + \text{Max}\{t_{pi} - t_{pj}; 0\} \quad [28]$$

$$t_{fij} \left[\frac{\min}{juna} \right] = t_{pi} + m_{fi} \quad [29]$$

Kaavoissa 28 ja 29 käytetyt termit ovat samoja mitä edellä CAP 1:n tapauksessa (kaavat 21–22), mutta sillä erolla, että indeksit i ja j kertovat junatypin lisäksi myös ajosuunnan. Toisin sanoen kullekin junatyypille muodostetaan kaksi indeksiä – yksi molempia ajosuuntia kohti. Yksiraiteisille rataosille junakombinaatioiden odotettu lukumäärä n_{ij} lasketaan kaavan 30 avulla.

$$n_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j \cdot k_{ij}}{\sum_i n_i^2 \frac{s}{2}}, k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{jos junat } i \text{ ja } j \text{ kulkevat samaan suuntaan} \\ s-1, & \text{jos junat } i \text{ ja } j \text{ kulkevat vastakkaisiin suuntiin} \end{cases}, \text{ missä [30]}$$

s = samaan suuntaan ajavien peräkkäisten junien keskimääräinen lukumäärä

n_i ja n_j = junatyypin lukumäärä kulkusuunnittain (esimerkiksi, jos rataosalla liikennöi kolme erilaista junatyyppiä n_1 , n_2 , ja n_3 edustavat junatyyppejä 1, 2 ja 3, jotka liikennöivät asemalta A asemalle B ja vastaavasti n_4 , n_5 , ja n_6 samoja junatyyppejä 1, 2, ja 3, jotka liikennöivät asemalta B asemalle A)

Kuten edellä CAP 1 -mallin tapauksessa yksiraiteisille rataosille saadaan johdettua vastaava laskukaava jäljelle jäävälle vapaan kapasiteetin määrälle (kaava 31).

$$\delta_k = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot t_{fkk} \cdot (s-1) \cdot \left(\sum_i \sum_j n'_i \cdot n'_j \cdot t_{fij} - T \cdot C_{ut} \cdot \frac{s}{2} \cdot \sum_i n'_i \right)}}{2 \cdot t_{fkk} \cdot (s-1)}, \text{ missä [31]}$$

$$b = \left(T \cdot C_{ut} \cdot \frac{s}{2} - \sum_i (t_{fik} \cdot k_{ik} + t_{fki} \cdot k_{ki}) \cdot n'_i \right) \quad \text{jos } s > 1 \quad [32]$$

tai

$$\delta_k = \frac{T \cdot C_{ut} \cdot \sum_i n'_i - 2 \cdot \sum_i \sum_j n'_i \cdot n'_j \cdot t_{fij}}{T \cdot C_{ut} - 2 \cdot \sum_i (t_{fik} \cdot k_{ik} + t_{fki} \cdot k_{ki}) \cdot n'_i} \quad \text{jos } s = 1 \quad [33]$$

4.6 Sveitsiläinen CAPACITY-malli (Viegas et al. 2003)

Sveitsin valtionrautateiden (SBB) kehittämä CAPACITY-mallin lähtökohtana on käytetty UIC 405 -menetelmää. UIC:n mallista poiketen CAPACITY-malli ei tarvitse lähtötiedoksi olemassa olevaa aikataulua. UIC 405:n kaavassa (ks. kapale 4.3.4) esiintyvä termi n_{ij} (= tapausten lukumäärä, joissa samaan suuntaan ajava juna j seuraa junaa i) on CAPACITY-mallissa korvattu likiarvolla, joka saadaan laskettua kaavan 34 avulla.

$$n_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{N}, \text{ missä} \quad [34]$$

- n_{ij} = tapausten lukumäärä, joissa samaan suuntaan ajava juna j seuraa junaa i
 n_i = junien i lukumäärä tarkasteltavan ajanjakson T aikana.
 n_j = junien j lukumäärä tarkasteltavan ajanjakson T aikana.
 N = junien kokonaismäärä tarkasteltavan ajanjakson T aikana
 $(N = \sum_i n_i)$

Vaikka kaava 34 ei annakaan tuloksena tarkkaa arvoa, kokemus on osoittanut, että n_{ij} :n virhemarginaali jää suhteellisen pieneksi. Eräässä tutkimuksessa, jossa tarkasteluajankohtana rataosalla liikennöi 21 junaa, jotka edustivat 6 eri juna-tyyppiä, n_{ij} :n virheen keskiarvo oli $\pm 0,05$ junaa ja maksimivirhekin ainoastaan $\pm 0,2$ junaa. Kun tämä virhemarginaali hyväksytään, voidaan rataosan kapasiteetti laskea kaavan 35 avulla.

$$L = \frac{T}{t_{fm}} \cdot C_{ut} \cdot V, \text{ missä} \quad [35]$$

- L = rataosan kapasiteetti tarkasteluajanjaksolla T [junaa]
 T = tarkasteltavan ajanjakson pituus [min]
 t_{fm} = yksittäisten junien varaamien aikojen odotettu keskiarvo, kun junat kulkevat minimijunavälein [min/juna]
 C_{ut} = suurin mahdollinen kapasiteetin käyttöaste [%]
 V = raiteiden lukumäärä

Yksittäisen junan varaaman ajan odotusarvo t_{fm} lasketaan kaavalla 36:

$$t_{fm} = \frac{t_{ftot}}{N}, \text{ missä} \quad [36]$$

- t_{ftot} = Liikennöinnin aiheuttama minimikokonaisvarausaika tarkasteltavalla ajanjaksolla T
 N = suunniteltujen junien kokonaismäärä tarkasteltavalla ajanjaksolla T

Edelleen, kaavassa 36 esiintyvä kokonaisvarausaika $t_{\text{f}ot}$ voidaan laskea kaavalla 37.

$$t_{\text{f}ot} = \sum (t_{\text{f}ij} \cdot n_{ij}), \text{ missä} \quad [37]$$

- $t_{\text{f}ij}$ = junan varaama aika tilanteessa, jossa j-tyypin juna seuraa junatyyppeä i.
 n_{ij} = niiden tapausten odotettu lukumäärä, missä j-tyypin juna seuraa i-tyypin juna.

Yhden junan varaama aika sellaisessa tilanteessa, jossa junatyyppi j seuraa junatyyppiä i ($t_{\text{f}ij}$), voidaan laskea joko rataosan turvalaitteiden ominaisuuksien perusteella tai, kuten Viegas et al. (2003) esittävät, junien ajoaikojen ja niihin liittävien liikenteen täsmällisyyden takaavien pelivara-aikojen avulla (kaava 38).

$$t_{\text{f}ij[\text{min}]} = d_{\text{fi}} + m_{\text{fi}} + \text{Max}\{t_{\text{pi}} - t_{\text{pj}}; 0\}, \text{ missä} \quad [38]$$

- t_{pi} = junan i ajoaika
 d_{fi} = junaväli tarkasteltavalla välillä sellaisissa tilanteissa, joissa junatyyppi i on kulkenut edeltä
 m_{fi} = pelivara, jonka avulla liikenne palautuu nopeammin mahdollisista viiveistä

Kaavassa 38 esiintyvät termit ovat samoja mitä on havainnollistettu kuvassa 22 CAP 1 ja CAP 2 -mallien yhteydessä. Suurin osa CAPACITY-mallin parametreista, kuten t_{pi} , d_{fi} sekä m_{fi} , voidaan määrittää usealla eritavalla. Parhaiten soveltuvaan määrittäystapa riippuu jokaisessa tapauksessa käytössä olevien lähtötietojen määrästä ja laadusta. Sveitsiläinen SBB laskee kaavassa 38 esiintyvät parametrit seuraavasti (kaavat 39–41):

$$t_{\text{pi}} = \frac{l}{v_i} + n_{\text{ai}} \cdot t_{\text{ai}}, \text{ missä} \quad [39]$$

- t_{pi} = junan i ajoaika
 l = tarkasteltavan rataosan pituus
 v_i = junatyyppin i keskimääräinen ajonopeus
 n_{ai} = kunkin junatyyppin pysähdysten keskimääräinen lukumäärä
 t_{ai} = keskimääräisen pysähdysten kesto

$$d_{fi} = d_i \cdot d_t, \text{ missä} \quad [40]$$

- d_{fi} = junaväli tarkasteltavalla välillä [min]
 d_i = minimijunaväli
 d_t = suojastusjärjestelmästä riippuva korjauskerroin ($d_t \geq 1$)

$$m_{fi} = m_i + m_t, \text{ missä} \quad [41]$$

- m_{fi} = aikataulun kokonaispelivara [min]
 m_i = yleisesti käytetty pelivara
 m_t = liikennepaikan tai radan geometriasta johtuva lisäpelivaraan ($m_t \geq 0$)

4.7 Italialaisia menetelmiä kapasiteetin laskemiseen

4.7.1 Italialainen menetelmä teoreettisen maksimikapasiteetin laskemiseksi

1970-luvulla Italiassa on käytetty laskukaavaa 42 rataosan maksimikapasiteetin määrittämiseen (Junnila 1974):

$$P = N + \frac{T - t - n \cdot (p + i) - n' \cdot (p' + i)}{p' + i}, \text{ missä} \quad [42]$$

- P = rataosan teoreettinen maksimikapasiteetti [junaa/24h]
 N = nykyisen aikataulun mukaiset junamäärät (tavara- ja henkilöjunat yhteensä)
 T = Tarkasteltava aikajakso minuutteina [24 h = 1440 min]
 t = radanpidolle varattu aika [sähköistetyillä rataosilla käytetty 90 min]
 n = aikataulun mukaisten henkilöjunien lukumäärä
 n' = aikataulun mukaisten tavarajunien lukumäärä
 p = henkilöjunien keskimääräinen ajoaika [min]
 p' = tavarajunien keskimääräinen ajoaika [min]
 i = junakohtauksista /-ohituksista aiheutuva keskimääräinen odotusaika

Kokemus on kuitenkin osoittanut, että kaavalla 42 laskettu maksimikapasiteetin arvo on ainoastaan teoreettinen, eikä sitä todellisuudessa koskaan saavuteta.

Käytännön kapasiteetti saadaan kertomalla teoreettinen maksimiarvo korjauskerroimella f (kaava 43).

$$P' = f \cdot P, \text{ missä} \quad [43]$$

- P' = rataosan käytännön maksimikapasiteetti
 P = rataosan teoreettinen maksimikapasiteetti [junaa/24h]
 f = korjauskerroin, jonka arvo riippuu paikallisista liikenne- ja rataolosuhteista

4.7.2 Bianchin malli (Galaverna & Sciotto 2004):

Italialainen Bianchi esitteli yhden yksinkertaisimmista ratakapasiteetin laskentamenetelmistä. Bianchin teorian mukaan radan linjakapasiteetti voidaan laskea junien ajoaikojen painotetun keskiarvon avulla (kaava 44).

$$C = \frac{K \cdot T}{\bar{\rho}}, \text{ missä} \quad [44]$$

- C = rataosan kapasiteetti
 K = korjauskerroin ($0 < K < 1$)
 T = aika vuorokaudessa, jonka rataosa on varattu liikennöinnille (yleensä 22 tai 24 tuntia)
 $\bar{\rho}$ = junien ajoaikojen painotettu keskiarvo kriittisellä rataosalla

Junien ajoaikojen painotettu keskiarvo saadaan laskettua kaavalla 45:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^N n_j \cdot (p_j + t_{mj}), \text{ missä} \quad [45]$$

- N = erilaisten junatyyppeiden lukumäärä
 n_j = junien j lukumäärä [junaa/vrk]
 n = kaikkien junien kokonaislukumäärä [junaa/vrk]
 p_j = junan j ajoaika radan kriittisellä osalla
 t_{mj} = opastin- ja suojustusjärjestelmien vaatima lisäaika

Jos Bianchin teoriaa halutaan soveltaa yksiraiteisille rataosille, tulee joko junien ajoaikoihin p_j tai lisäaikoihin t_{mj} lisätä vastakkaiseen suuntaan kulkevien junien junakohtaamisista aiheutuva ylimääräinen odotusaika.

4.7.3 Ferrovie dello Staton menetelmä (Galaverna & Sciotto 2004)

Italian valtion rautatiet (Ferrovie dello Stato) on käyttänyt seuraavaa kaavaa 46 kapasiteetin laskemisessa:

$$C = \left\{ n_0 + \left[T - \sum_{j=1}^N n_j \cdot (\rho_j + t_{mj}) \right] \cdot \frac{1}{\bar{\rho}_i + \bar{t}_m} \right\} \cdot K, \text{ missä} \quad [46]$$

C	= Rataosan kapasiteetti
n_0	= tarkastelevalla rataosalla tällä hetkellä liikennöivien junien lukumäärä
T	= tarkasteltavan ajanjakson pituus
t_{mj}	= opastin- ja suojustusjärjestelmien edellyttämä operointiaika
$\bar{\rho}$	= henkilöjunien ajoaikojen painotettu keskiarvo
\bar{t}	= opastin- ja suojustusjärjestelmien edellyttämien operointiaikojen painotettu keskiarvo
n_j	= junien j kokonaismäärä vuorokaudessa
K	= Korjauskerroin ($0 < K < 1$)

FS:n kaavaa voidaan pelkistää luokittelemalla junat ja määrittämällä niiden ajoajat sekä opastin- ja suojustusjärjestelmien operointiaikojen painotetut keskiarvot ainoastaan kahdelle eri junatyypille: tavara- ja henkilöjunille. Painotetut keskiarvot \bar{t} ja $\bar{\rho}$ lasketaan kuten edellä Bianchin teoriassa (kaava 45).

4.7.4 Corrieren teoria (Galaverna & Sciotto 2004)

Corriere jatkoi Italian valtion rautateiden teorian kehittämistä ja muodosti sen pohjalta oman ratakapasiteetin laskentamenetelmän. Teoria pyrki selittämään edeltäjiänsä paremmin erilaisten opastinjärjestelmien sekä rataverkolla tapahtuvien viiveiden vaikutuksen kapasiteettiin. Corrierin teorian mukaan radan linjakapasiteetti saadaan laskettua seuraavalla kaavalla (47).

$$C = \left\{ n_0 + \left[T - \sum_{j=1}^{N-1} n_j \cdot \rho_j (1 + d_j V_j) \right] \cdot \frac{1}{\rho_i \cdot (1 + d_i V_i)} \right\} \cdot K, \text{ missä} \quad [47]$$

V_i ja V_j = junaluokkien i ja j käytännön ajonopeuksia

d_i ja d_j = viiveparametrit, jotka ilmoittavat rataosalla tapahtuvat viiveet pituusyksikköä kohden

Muut kaavan 47 lyhenteet ovat samoja mitä edellä FS:n teorian yhteydessä (kaava 46).

Kaavasta 47 havaitaan, että Corrierin malli ottaa huomioon nykyisessä liikennöinnissä käytettyjen junien lukumäärän ja laskee linjan kapasiteetin summaamalla yhteen nykyisen junamäärän ja rataosalle sopivien lisäjuniin määrän. Mallissa junat on jaettu N :n luokkaan ja eri junatyypit on priorisoitu siten, että tärkeimmiksi juniksi määritellyt saavat alaindeksin i , kun taas alemman luokan junat saavat alaindeksin j . Kaavan viiveparametrit, d_i ja d_j , kuvaavat teknisistä syistä, kuten opastin- ja kauko-ohjausjärjestelmien toiminnasta, aiheutuvien viiveiden määrää.

4.7.5 Reitanin ja Malaspinan teoria

Reitani ja Malaspina esittelivät vuonna 1995 toistaiseksi uusimman italialaisen teorian ratakapasiteetin laskemiseen. Heidän teorian perustuu eräänlaiseen yhdistelmään perinteisen analyttisen laskennan ja tilastollisten menetelmien välillä. Teorian mukaan rataosan kapasiteetti voidaan laskea kaavan 48 perusteella. (Galaverna & Sciotto 2004):

$$C = \frac{T}{K' \cdot (H + t_m)}, \text{ missä} \quad [48]$$

C = rataosan kapasiteetti

T = aika, jonka rataosa on vuorokauden aikana varattu liikennöinnille (yleensä 22 tai 24 tuntia)

K' = korjauskerroin

\bar{H} = samaan suuntaan ajavien junien minimijunavälien painotettu keskiarvo

t_m = opastin- ja suojastusjärjestelmien vaatima lisäaika

Kaavassa 48 esiintyvä junavälien painotettu keskiarvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^N n_j \cdot H_j, \text{ missä} \quad [49]$$

- H_j = kahden peräkkäisen junan j välinen minimijunaväli
 n = tarkasteltavalla ajanjaksolla liikennöivien junien kokonaismäärä
 n_j = junien j lukumäärä tarkasteltavalla ajanjaksolla

Kahden samaan suuntaan ajavan peräkkäisen junan j minimiaikaväli H_j lasketaan seuraavasti:

$$H_j = \frac{L_c}{V_j}, \text{ missä} \quad [50]$$

- L_c = rataosan kriittisen välin pituus
 V_j = junien j todellinen keskinopeus tarkasteltavalla rataosalla

Kaavassa 50 esiintyvä junien j todellinen keskinopeus V_j ei vastaa aikataulunmukaista ajonopeutta, vaan termiin V_j on sisällytetty rataosalla tapahtuvien häiriöiden ja viiveiden vaikutus junien keskinopeuteen. Todellisten ja aikataulunmukaisten ajonopeuksien välille voidaan määrittää seuraava yhtälö (Galaverna & Sciotto 2004):

$$\frac{1}{V_j} = \frac{1}{S_j} + d \quad (j = 1, \dots, N), \text{ missä} \quad [51]$$

- d = rataosan viiveet pituusyksikköä kohden [viive/tarkasteltavan rataosan pituus]
 S_j = aikataulun mukainen ajonopeus
 V_j = junien j keskinopeus tarkasteltavalla rataosalla

Pituusyksikköä kohden laskettu viive d voidaan ratkaista $V_{j:n}$, $S_{j:n}$, ja $n_{j:n}$ funktiona. Tarkasteltaessa yksiraitaisia rataosia tulee d :n laskennassa ottaa huomioon myös junien kohtaamisesta aiheutuvat odotusajat. (Galaverna & Sciotto 2004.)

4.8 Puolalainen menetelmä maksimikapasiteetin laskemiseen

Puolassa 1970-luvulta käytössä ollut menetelmä laskee yksiraiteisen radan kapasiteetin kriittiseen välin maksimivälityskyvyn perusteella. Tässäkin yhteydessä radan kriittisellä välillä tarkoitetaan sitä liikennepaikkaväliä, jossa junien ajoaika on suurin. Puolalainen laskukaava (kaava 52) poikkeaa kuitenkin monista muista menetelmistä siten, että se ilmoittaa radan maksimivälityskyvyn junapareissa. Toisin sanoen kaavassa on tehty oletus, että radalla kulkee molempiin suuntiin yhtä monta junaa, ja että seuraava juna kulkee aina vastakkaiseen suuntaan kuin edellinen. (Junnila 1974.)

$$N = \frac{1440}{t_1 + t_2 + d_1 + d_2}, \text{ missä} \quad [52]$$

- N = rataosan maksimikapasiteetti [junaparia/vrk]
- t_1 = kriittisen osan vaatima junan ajoaika suuntaan 1
- t_2 = junan ajoaika kriittisellä osalla suuntaan 2
- d_1 = minimiaika, joka vaaditaan ennen kuin vastakkaiseen suuntaan kulkeva juna voidaan lähteä liikkeelle edellisen junan saavuttua ratapihalle 1*.
- d_2 = minimiaika, joka vaaditaan ennen kuin vastakkaiseen suuntaan kulkeva juna voidaan lähteä liikkeelle edellisen junan saavuttua ratapihalle 2*.

**) Ratapihoilla 1 ja 2 tarkoitetaan niitä liikennepaikkoja, jotka sijaitsevat kriittisen osan päissä.*

Kokemus on osoittanut, että käytännön kapasiteetti 10–20 % on pienempi kuin kaavalla 52 laskettu teoreettinen arvo. Tarkka kerroin, jolla käytännön kapasiteetti saadaan laskettua teoreettisesta kapasiteetista, on aina tapauskohtainen ja sen arvo riippuu erityisesti rataosan junatyypin jakaumasta. (Junnila 1974.)

4.9 Japanilaisia menetelmiä kapasiteetin mittaamiseen

4.9.1 Yamagishin teoria (Yamagishi 1942)

Yamagishi kehitti teoriansa jo 1940-luvun alussa. Vaikka teoria on jo yli 60 vuotta vanha, on se silti tässä työssä esitellyistä menetelmistä selvästi pisimmälle kehitetyin. Itse asiassa Yamagishin teoria on niin laaja, ettei teoriaa kokonaisuudes-

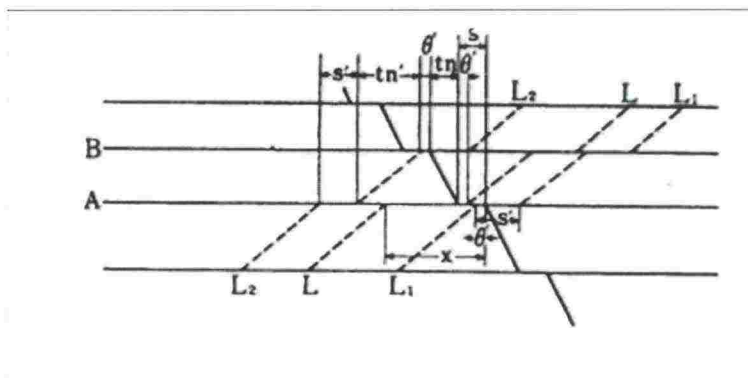
saan ole mahdollista esittää tämän diplomityön yhteydessä. Tähän kappaleeseen on koottu linjakapasiteetin kannalta keskeisiä osia Yamagishin teoriasta.

Yamagishin menetelmä perustuu junakohtaamisista ja ohituksista aiheutuviin erilaisten odotusaikojen tarkasteluun. Ennen varsinaisen laskentakaavan tarkastelua, on tekijöiden suuresta lukumäärästä johtuen perusteltua käydä ensin läpi teoriassa esiintyvät lyhenteet:

d	= odotusaika tilanteessa, jossa nopea juna ohittaa samaan suuntaan ajavan hitaamman junan [min]
g	= odotusaika, joka aiheutuu junakohtaamisesta, jossa hidas juna joutuu odottamaan vastakkaiseen suuntaan ajavaa nopeaa junaa [min]
g'	= odotusaika, joka aiheutuu junakohtaamisesta, jossa hidas juna joutuu odottamaan vastakkaiseen suuntaan ajavaa samanlaista junaa [min]
N'	= maksimikapasiteetti tarkasteltavalla raiteella
n (n')	= nopeiden (tai hitaiden) junien lukumäärä [junaa]
p	= (kohtausraiteella varustettujen asemien lukumäärä tarkasteltavalla rataosalla) -1
q	= [(ohitusraiteella varustettujen asemien lukumäärä tarkasteltavalla rataosalla) -1
s (s')	= vaadittu pysähdysaika rataosan liikennepaikoilla nopeille (tai hitaille) junille
t _d	= aika, jonka edellä kulkeva nopea juna tarvitsee kulkeakseen ohitusasemalta seuraavalle [min]
t _g	= aika, jonka edellä kulkeva nopea juna tarvitsee kulkeakseen edelliseltä ohitusasemalta seuraavalle [min]
t _m (t _m ')	= maksimiaika, jonka nopea (tai hidas) juna tarvitsee opastinvälin ajamiseen [min]
t _n (t _n ')	= keskimääräinen aika, jonka nopea (tai hidas) juna tarvitsee opastinvälin ajamiseen [min]
v (v')	= nopeiden (ja hitaiden) junien osuus kaikista junista $v = \frac{n}{N'}, \quad v' = \frac{n'}{N'}$
v''	= v:n arvo jäljellä oleville, välinopeudella ajaville junille kun $\sum v$ ja $\sum v'$ ovat yhtä suuret

- α = kahden peräkkäisen kohtaauspaikan välillä olevien asemien lukumäärä
- β (β') = nettoaika, jonka nopea (tai hidas) juna tarvitsee kahden peräkkäisen kohtaauspaikan välisen matkan kulkemiseen [min]
- θ = minimiaika, joka kuluu ennen kuin seuraavalle junanalle voidaan antaa kulkulupa, kun edellinen juna on vapauttanut opastinvälin [min]
- θ' = minimiaika, joka kuluu asemalla tapahtuvaan junakohtaukseen [min]
- τ_m' = maksimijoaika, jonka hidas juna tarvitsee opastinvälin kulkemiseen [min]
- τ_n (τ_n') = keskimääräinen ajoaika, jonka vastaan tuleva kohtausasemalta lähtevä tai hidas juna tarvitsee opastinvälin kulkemiseen. [min]

Yamagishin teorian mukainen kapasiteettitarkastelu alkaa kohtaamistilanteesta, jossa hidas juna joutuu odottamaan vastaan tulevaa junaa. Odotusajan laskenta lähtee oletuksesta, että nettoajokaikta asemalta A asemalle B on yhtä suuri kuin keskimääräinen nettoajokaikta. Kohtaamistilanne on esitetty kuvassa 25, jossa hitaamman junan L aikataulu valitaan optimaalisesti siten, että junakohtaaminen voidaan suorittaa asemalla A.



Kuva 25. Asemalla A tapahtuvan junakohtaamisesta aiheutuvan odotusajan määrittäminen

Kuvan 25 tapauksessa junan L odotusajalle voidaan muodostaa seuraava kaava:

$$g = x - s + \theta' - s' = x + \theta' - (s' + s) \quad [53]$$

Edelleen odotusaika saadaan minimoitua, kun juna L on kohdassa L_1 , tai kun $\theta = 0$ (kaava 54). Tällöin minimiodotusajalle voidaan johtaa seuraava kaava:

$$g_{\min} = 2\theta' - (s' + s) \quad [54]$$

Vastaavasti maksimiodotusaika aiheutuu silloin, kun juna L on paikassa L₂. Tällöin maksimiodotusajalle saadaan seuraava kaava:

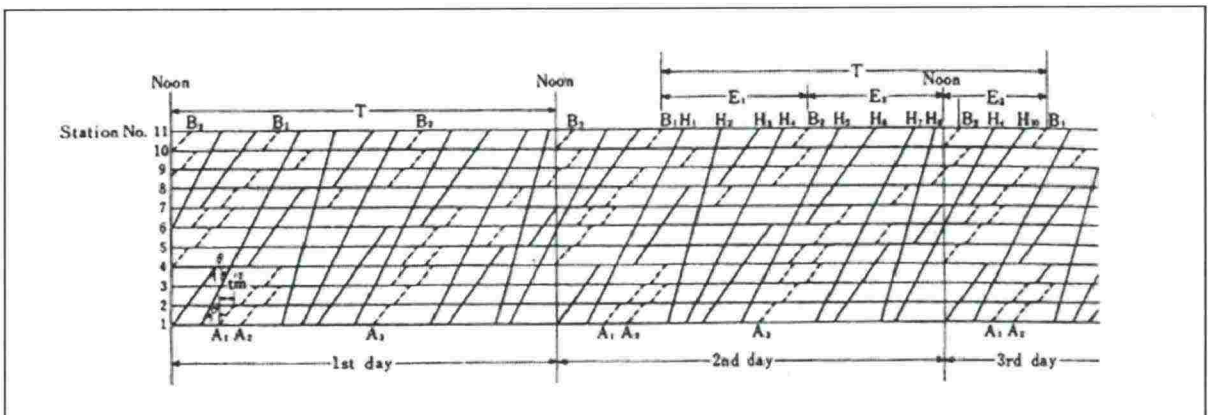
$$g_{\max} = t_n' + \delta' + \tau_n + \delta' = t_n' + \tau_n + 2\delta' \quad [55]$$

Näin ollen odotusaikojen keskiarvolle voidaan kaavojen 54 ja 55 avulla johtaa seuraava kaava:

$$g = \frac{1}{2} \cdot (g_{\min} + g_{\max}) = 0,5 \cdot (t_n' + \tau_n) + 2\delta' - 0,5 \cdot (s' + s) \quad [56]$$

Samoin periaattein miten edellä olevat kaavat (53–56) on johdettu, voidaan muodostaa odotusajan kaava myös sellaiselle tilanteelle, jossa hidas juna kohtaa samalla asemalla kaksi tai useampia vastakkaiseen suuntaan kulkevia junia. Vastaavasti kaava voidaan muodostaa myös sellaiselle tilanteelle, jossa hidas juna kohtaa samanaikaisesti sekä samaan että vastakkaiseen suuntaan kulkevan junan.

Yamagishin peruskaava laskee raiteen teoreettisen maksimikapasiteetin eri nopeudella ajavien junien lukumäärän sekä ajo-, kohtaus- ja odotusaikojen perusteella. Tapauksen selkeyttämiseksi on havainnollisempaa tarkastella ainoastaan toiseen suuntaan liikennöivää liikennettä. Kuvaan 26 on piirretty graafinen aikataulu tilanteesta, johon on ensin sijoitettu kolme nopeaa junaa, jonka jälkeen hitaita junia on sovitettu aikatauluun niin monta kuin mahdollista. Hitaiden junien sijoittelussa on tehty päätös, että ne voidaan ohittaa millä tahansa asemalla.



Kuva 26. Graafinen aikataulu, jossa on selvytyden vuoksi esitetty ainoastaan toiseen suuntaan liikennöivät junat (yhtenäinen viiva = nopea juna, katkoviiva = hidas juna)

Oletetaan, että kuvassa 26 kaksi hidasta junaa lähtee liikkeelle peräkkäin asemalta 1 ajanhetkillä A_1 ja A_2 sekä saapuvat asemalle 11 ajanhetkillä B_1 ja B_2 . Tällöin junien junaväli asemalla 1 on $(t_m' + \theta)$, mutta asemalla 11 se on kaikkien $(t_m' + \theta)$:ien ja matkan aikana tapahtuneiden viiveiden summa. Ylimääräiset viiveet johtuvat siitä, että jälkimmäisen junan on päästettävä ohitseen neljä nopeaa junaa enemmän kuin edellä ajavan. Näiden kahden junan lisäksi aikatauluun on mahdollista piirtää ainoastaan yksi hidas juna, joka lähtee asemalta 1 ajanhetkellä A_3 . Kuvan perusteella tämä kolmas juna A_3 ei varsinaisesti seuraa edellä ajavaa junaa A_2 , mutta ohituksista johtuen on mahdollista, että ennen asemaa 1 junat ovat ajaneet peräkkäin.

Kuvasta 26 voidaan nähdä, että asemalla 11 hitaiden junien junavälien summa on 24 tuntia (= 1440 minuuttia), ja että päivittäin raiteella liikennöi 2, 3, tai 5 nopeaa junaa. Tämän perusteella saadaan:

$$1440 = E_1 + E_2 + E_3 = 3 \cdot (t_m' + \theta) + 2d_1 + 5d_2 + 3d_3^*$$

^{*)} E_1, E_2 ja E_3 ovat kuvassa 26 havainnollistettuja etäisyyksiä.

Tästä voidaan edelleen johtaa kaavan yleinen muoto:

$$1440 = n' \cdot (t_m' + \theta) + \sum nd \quad [57]$$

Kaavaa 57 muokkaamalla saadaan lopulta teoreettisen ratakapasiteetin yleinen laskenta kaava:

$$N' = \frac{1440}{(v' \cdot (t_m' + \theta) + \sum v_i d)}, \text{ missä} \quad [58]$$

Kaavan 58 antama teoreettinen tulos voidaan muuttaa käytännön kapasiteetiksi N kertomalla edellä saatu teoreettinen tulos korjauskertoimella f (kaava 59).

$$N = f \cdot N' \quad [59]$$

Korjauskertoimelle f on kokemuksen perusteella annettu seuraavia ohjeellisia arvoja:

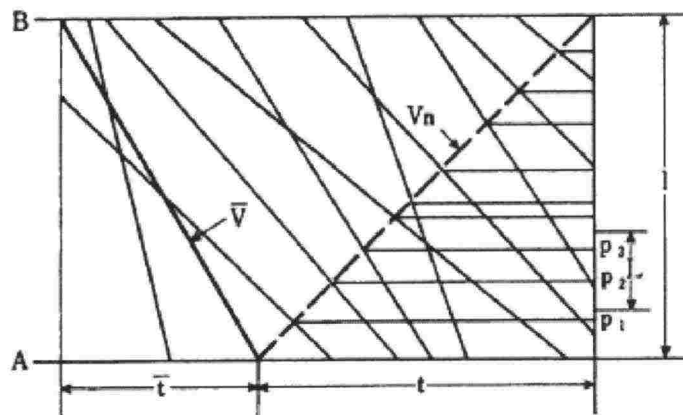
- $f = 0,60-0,75$: tärkeillä radoilla, missä on vain pieniä mahdollisuuksia kasvattaa huipputuntien junamääriä
- $f = 0,50-0,60$: paikallisliikennerradoilla
- $f = 0,55-0,65$: muilla radoilla

4.9.2 Nishinon teoria (Takahashi 1962)

Yasuyuki Nishinon teorian perustana on oletus siitä, että junien asemalle saapumisaikojen jakauma on Poisson-jakautunut. Tämä oletus tekee ratakapasiteetin laskemisesta kohtalaisen yksinkertaisen.

Eniten junakohtaamisia ja ohituksia tapahtuu rataosalla siellä liikennöiville kaikkein hitaimmille junille. Nishio toteaa, että aikatauluttaessa näitä kaikista hitaimpia junia, tulisi niiden junakohtaamiset ja ohittamiset suunnitella siten, että hitaalle junalle saadaan aikaiseksi mahdollisimman monta joustavaa junakohtaamista. Kun aikataulu on näin laadittu, voidaan vastakkaiseen suuntaan ajavien junien lukumäärää ajatella eräänlaisena kapasiteetin tunnuslukuna.

Kuvassa 27 on esitetty yhden hitaan junan kulku katkoviivalla asemalta A asemalle B. Matkalla se kohtaa useita vastakkaiseen suuntaan ajavia junia. Vastaantulevien junien määrä alkaa ensimmäisestä junasta, joka on lähtenyt asemalta B liikkeelle jo ennen tarkasteltavan junan liikkeellelähtöä, ja kattaa kaikki ne junat, jotka ovat lähteneet liikkeelle ennen tarkasteltavan junan saapumista määräasemalle. Kuvassa esiintyvä aikatauluviiva \bar{V} kuvaa kaikkien vastaantulevien junien keskimääräistä ajoaikaa asemalta B asemalle A.



Kuva 27. Hidas juna kohtaa mahdollisimman monta vastakkaiseen suuntaan kulkevaa junaa (Takahashi 1962).

Kuvassa 27 esitettyjen junakohtausten lukumäärä voidaan nyt laskea kaavalla 60.

$$C = \frac{t + \bar{t}}{m}, \text{ missä} \quad [60]$$

C	= junakohtausten lukumäärä
t	= rataosan hitaimman junan tarkasteltavan välin ajoaika
\bar{t}	= vastaantulevien junien keskimääräinen matka-aika tarkasteltavalla välillä
m	= kohdattavien (vastakkaiseen suuntaan kulkevien) junien keskimääräinen junaväli

Kun hitaan junan V_n kohtaamat junat liikennöivät satunnaisesti, asettuvat myös junien kohtauspisteiden projektiot matka-akselille (p_1, p_2, \dots) täysin satunnaisesti. Näin ollen kohtausaikojen jakauma voidaan ajatella Poisson-jakautuneeksi. Näin ollen voidaan edelleen johtaa, jos matka-akselia liikutaan pituuden L verran eteenpäin, todennäköisyys sille, että matkan aikana tapahtuu junakohtaamisia x kappaletta, voidaan laskea kaavalla 61.

$$P(x) = \frac{(a^x e^{-a})}{x!} \quad [61]$$

Tässä tapauksessa:

$$a = C \cdot \frac{L}{l}, \text{ missä} \quad [62]$$

C	= junakohtausten lukumäärä
L	= rataosan kohtauspaikkojen keskimääräinen etäisyys
l	= tarkasteltavan rataosan kokonaispituus

Jos kaavassa 62 L on kohtauspaikalla varustettujen liikennepaikkojen välinen keskimääräinen etäisyys, $P(x)$ ilmoittaa todennäköisyyden sille, että hidas juna V_n kohtaa x kappaletta vastaan tulevia junia matkansa aikana. Jos kohtaamisten lukumäärä on 0 tai 1, voidaan hitaan junan kulun olevan sujuvaa. Kaavassa 63 E edustaa tällöin häiriöttömän junaliikenteen todennäköisyyttä.

$$E = \sum \left[\frac{a^x e^{-a}}{x!} \right] \quad [63]$$

Tehdyssä tapaustutkimuksessa E sai seuraavanlaisia arvoja:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Jos } V < 14 \text{ km/h, } E = 0,04V + 0,25 \\ \text{Jos } V > 14 \text{ km/h, } E = 0,01V + 0,67 \end{array} \right\}, \text{ missä}$$

V = hitaan junan keskimääräinen ajonopeus [km/h]

Yhdistämällä kaavat 60 ja 62 saadaan:

$$m = \frac{t + \bar{t}}{C} = \frac{t + \bar{t}}{aR}, \text{ missä} \quad [64]$$

$$R = \frac{l}{L} (\text{junakohtauspaikkojen lukumäärä} + 1)$$

Edelleen kohdattavien junien kokonaislukumäärä N_s voidaan laskea seuraavasti:

$$N_s = \frac{1440}{m} = \frac{1440 \cdot aR}{t + \bar{t}} \quad [65]$$

Koska tähän mennessä teoria on huomioinut vain toiseen suuntaan liikennöivät junat, saadaan kaksiraiteisen rataosan kokonaiskapasiteetti N laskettua kertomalla kaava 65 kahdella (kaava 66).

$$N = \frac{1440 \cdot 2aR}{t + \bar{t}} \quad [66]$$

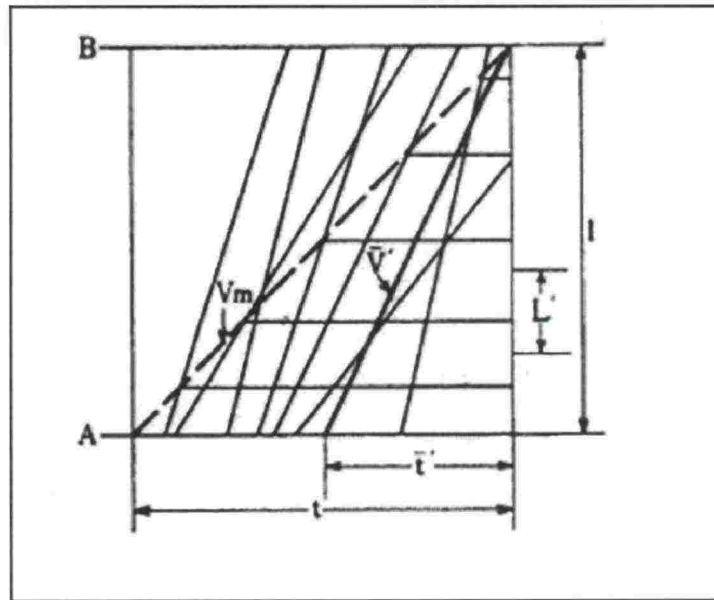
Kaava 66 perustuu junakohtaamisiin, mutta vastaavanlainen kaava voidaan johtaa myös ohitustapausten perusteella (kaava 67).

$$N = \frac{1440 \cdot 2aU}{(1 - kn) \left(t - \bar{t} \right)}, \text{ missä} \quad [67]$$

kn = hitaiden junien osuus kaikista junista

U = $\frac{l}{L}$ (ohituspaikkojen lukumäärä + 1)

Kaavan 67 termit on havainnollistettu kuvassa 28.



Kuva 28. Nishion teorian soveltaminen ohitustilanteisiin (Takahashi 1962).

4.9.3 Pelkistetty japanilainen laskentakaava

Takahashi (1962) esittelee artikkelissaan Yamagishin ja Nishion teorian lisäksi kolmannen japanilaisen laskukaavan kapasiteetin laskemiseksi. Tämä erittäin pelkistetty kaava soveltuu karkeaan arviointiin ja se perustuu kahden peräkkäisen liikennepaikan välisten ajoaikojen ja kauko-ohjaus- ja opastinjärjestelmien ope-
rointiaikojen pituuksiin (kaava 68).

$$N' = \frac{1440}{T + C}, \text{ missä} \quad [68]$$

- N' = raiteen teoreettinen maksimikapasiteetti
 T = junien keskimääräinen ajoaika tarkasteltavalla kohtauspäikkävälillä
 C = kauko-ohjaus- ja opastinjärjestelmien vaatimat minimioperointiajat (yleensä 1,5–2,5 minuuttia)

4.10 Tawastin kaava

H.J. Tawastin (1974) mukaan rataosan kapasiteetti voidaan laskea kolmen osamäärämuotoisen termin (y_1 , y_2 ja y_3) avulla, joille kaikilla on yhteinen nimittäjä. Termi y_1 ilmoittaa mahdollisten aikatauluviivojen (junien) maksimimäärän kriittisellä rataosalla, ja se voidaan laskea kaavan 69 avulla. Kriittisellä osalla tarkoi-

tetaan tässä yhteydessä sitä rataosan junakohtauspaikkaväliä, jossa junaparin käyttämät matka-ajat ovat suurimmat.

$$y_1 = \frac{24,6}{t_k + \frac{t_A + t_B}{2}}, \text{ missä} \quad [69]$$

- y_1 = mahdollisten aikatauluviivojen lukumäärä
 t_k = junien keskimääräinen ajoaika kriittisellä kohtaauspaikkavälillä
 t_A = ns. operointiaika, joka kuluu junakohtauspaikalla A junasuoritukseen edellisen junan tulon ja toisen junan lähdön välillä. (A ja B ovat tarkasteltavan kohtaauspaikkavälin peräkkäiset kohtaauspaikat.)
 t_B = operointiaika, joka kuluu junakohtauspaikalla B junasuoritukseen edellisen junan tulon ja toisen junan lähdön välillä. (A ja B ovat tarkasteltavan kohtaauspaikkavälin peräkkäiset kohtaauspaikat.)

Termi y_2 lasketaan kaavalla 70 ja se ilmoittaa montaako aikataulua varten operointiajoista vapautuu aikaa junajonomuodostuksen ansiosta määräävällä osuudella (Tawast 1974).

$$y_2 = \frac{(r - p) \cdot \frac{t_A + t_B}{2}}{t_k + \frac{t_A + t_B}{2}}, \text{ missä} \quad [70]$$

- y_2 = vapautuvien aikataulujen (junien) määrä
 r = junajonoihin kuuluvien aikataulujen (junien) lukumäärä määräävällä, junakohtausliikennepaikkojen välisellä osuudella
 p = junajonojen lukumäärä kriittisellä kohtaauspaikkavälillä
 t_A, t_B ja t_k = kuten edellä (kaava 69)

Tawastin kaavan kolmas termi y_3 (kaava 70) ilmoittaa vapautuvien aikatauluviivojen (junien) lukumäärän, kun otetaan huomioon linjasuojastuksen vaikutus junajonomuodostukseen (Tawast 1974).

$$y_3 = \frac{\frac{u-1}{u} \cdot (r-p) \cdot t_k}{t_k + \frac{t_A + t_B}{2}}, \text{ missä} \quad [71]$$

- y_3 = linjasuojastuksen ansiosta vapautuvat lisäaikatauluviivat (-junat)
 u = suojastusvälien lukumäärä (oletuksena suojastusvälit samansuuruisia) linjasuojastetulla, kriittisellä kohtaustaikkavälillä
 t_A, t_B, t_k = kuten edellä (kaavat 69 ja 70)
 r ja p = kuten edellä (kaavat 69 ja 70)

Rataosan kapasiteetti y_{\max} saadaan laskettua edellä esitettyjen termien y_1, y_2 ja y_3 summana (Tawast 1974):

$$y_{\max} = y_1 + y_2 + y_3 \quad [72]$$

Yhdistämällä kaavat 69, 70, 71 ja 72 saadaan lopulta rataosan kapasiteetille muodostettua seuraava laskukaava (Tawast 1974):

$$y_{\max} = \frac{24,6}{t_k + \frac{t_A + t_B}{2}} + \frac{(r-p) \cdot \frac{t_A + t_B}{2}}{t_k + \frac{t_A + t_B}{2}} + \frac{\frac{u-1}{u} \cdot (r-p) \cdot t_k}{t_k + \frac{t_A + t_B}{2}} \quad [72]$$

Kaavan 72 termit ja niiden selitykset ovat samoja kuin kaavoissa 69–70 aiemmin käytetyt. Edellä esitettyjen kaavojen avulla voidaan johtaa vielä yksi kaava [73], joka ilmoittaa prosentteina linjasuojastuksen merkityksen aikataulukapasiteettiin (Tawast 1974).

$$P_1 = \frac{y_3 \cdot 100}{(y_1 + y_2)}, \text{ missä} \quad [73]$$

- P_1 = Linjasuojastuksen hyöty aikataulujen lukumäärään [%]
 y_1, y_2 ja y_3 = kuten edellä (kaavat 69–71)

Tawast (1974) huomauttaa, että kaavalla 72 laskettuun maksimiarvoon voidaan päästä ainoastaan siinä tapauksessa, että aikataulusuunnittelija voi aloittaa aikataulujen laatimisen tyhjästä, eikä aikataulun laadintaa rajoita yksikään ennalta määriteltä aikataulu. Rataosalla, jolla on jo ennalta sidottuja aikatauluja (y_s) käytännön aikataulujen määrä voidaan laskea kaavalla 74.

$$y_k = y_{\max} - \frac{y_s}{2}, \text{ missä} \quad [74]$$

y_k	= käytännön aikataulujen lukumäärä
y_s	= ennalta sidottujen aikataulujen lukumäärä
y_{\max}	= aikataulujen suurin mahdollinen lukumäärä

Ronni (1994) on arvioinut Tawastin kaavan soveltuvuutta Helsinki–Turku-radalle ja toteaa kaavan olevan edelleen käyttökelpoinen rataosan kapasiteetin arvioinnissa. Ronni kuitenkin kritisoi menetelmää siitä, ettei se ota huomioon kannattavan liiketaloudellisen toiminnan kapasiteetille asettamia reunaehtoja.

4.11 Arvio ja yhteenveto linjakapasiteetin laskentamenetelmistä

Edellisissä kappaleissa on esitetty 16 varsinaista kapasiteetin analysointimenetelmää. Näistä 14 antaa tulokseksi suurimman mahdollisen liikennesuorituksen aikayksikköä kohden ja kaksi kapasiteetin käyttöasteen tarkasteltavalta ajanjaksolta.

Vaikka esitellyt menetelmät edustavat pitkää ajanjaksoa – vanhin menetelmistä (Yamagishin teoria) on kehitelty jo 1940-luvulla ja uusimmat tällä vuosikymmenellä – on menetelmissä yleisesti ottaen havaittavissa paljon yhteneväisyyksiä ja samankaltaisia laskentaperiaatteita. Esimerkiksi tarkasteltaessa menetelmien tarvitsemia lähtötietoja havaitaan, että useassa menetelmässä toistuvat samat termit. Yleisimmin menetelmissä tarvittavia lähtötietoja ovat peräkkäisten junien minimijunaväli, erilaisten junatyypin ajoajat ja nopeudet sekä junatyypin jaksot. Näiden lisäksi menetelmissä käytetään lähtötietona muun muassa juna-kohtauksista ja ohittamisesta tapahtuneita viiveitä sekä kauko-ohjaus-, suojastus- ja opastinjärjestelmistä aiheutuvia lisäaikoja. Tarkimmillaan menetelmät tarvitsevat lähtötiedoikseen tarkastelu hetkellä käytössä olevan tai suunnitteella olevan aikataulun. Tarkasteltujen menetelmien tarvitsemat lähtötiedot on esitetty kootusti taulukossa 1.

Taulukko 1. Tarkasteltujen menetelmien vaatimat lähtötiedot (Menetelmiin lisätään vielä kappaleennumero, missä ne on esitelty).

Menetelmän tarvitsemat lähtötiedot	Menetelmä	Banverket (luku 4.2.1)	Pääreittiselvitys (luku 4.4.4)	UIC 406 (luku 4.3)	UIC 405 (luku 4.3.4)	Saksalainen menetelmä (luku 4.4)	CAP 1 & CAP 2 (luku 4.5)	CAPACITY (luku 4.6)	Italialainen menetelmä (luku 4.7.1)	Bianchin malli (luku 4.7.2)	FS:n menetelmä (luku 4.7.3)	Corriere (luku 4.7.4)	Reitani & Malaspina (luku 4.7.5)	Puolalainen menetelmä (luku 4.7.8)	Yamagishin teoria (luku 4.9.1)	Nishino (luku 4.9.2)	Tawastin kaava (luku 4.10)
Junien ajoajat/nopeudet		X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tietyn junatyyppin junien ukumäärä		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X
Minimijunavälit/Keskimääräinen junien lähtöaikaväli					X	X	X	X					X	X	X	X	X
Junakohtaamisista johtuva aikalisä		X		X					X						X	X	
Ajoajan pelivara				X	X		X								X		
Kunnossapidolle varattu aika				X					X								
Liikennöinnin varaama kokonaisaika				X													
Kauko-ohjaus, suojustus- tai opastinjärjestelmien tarvitsemat lisäajat		X								X	X		X				
Raiteiden lukumäärä								X									
Aikataulu		X	X	X					X						X	X	X
Tarkasteltavan ajanjakson pituus		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
Suurin sallittu kapasiteetin käyttöaste					X		X	X							X		
Pysähdysten/viiveiden kestot								X				X	X	X			
Rataosan tai sen kriittisen välin pituus								X					X			X	
Kohtauspaikkojen lukumäärä								X								X	
Suojustusvälien lukumäärä																	X

Yamagishin teoria vuodelta 1942 on esitellyistä menetelmistä selvästi vanhin, mutta samalla myös pisimmälle viety. Toinen ääripää on 1970-luvulla käytössä ollut puolalainen menetelmä, joka laskee kapasiteetin käytännössä ainoastaan kriittisen kohtauspaikkavälin ajoaikojen perusteella. Suurista yleistyksistä huolimatta tällaisten yksinkertaisten menetelmien etuna on niiden helppokäyttöisyys ja mahdollisuus saada vertailukelpoisia tuloksia hyvinkin pienillä lähtötiedoilla. Tarkastelun suorittajan on kuitenkin muistettava, että pelkistetyillä malleilla saattuihin tuloksiin sisältyy aina suhteellisen suuri virhemarginaali, eikä tällaisella

mallilla saatua absoluuttista arvoa tule käyttää kovin yksityiskohtaisen päätöksenteon pohjana.

Huomioitavaa tarkastelluissa menetelmissä on se, että ennakko-odotuksista poiketen iso osa esitellyistä menetelmistä soveltuu myös yksiraiteisten rataosien tarkasteluun. Tämä selittyy sillä, että vaikka yksiraiteisten rataosien suhteellinen lukumäärä muualla Euroopassa on paljon Suomen vastaava vähäisempi, ovat yksiraiteiset rataosat kapasiteetin kannalta kuitenkin niin paljon kriittisempiä, että niitä on järjestelmällisesti tutkittu lähes kaikissa maissa, joista yksiraiteisia rataosia ylipäättänsä löytyy.

Tarkastellut kapasiteetin käyttöasteen laskemiseen tarkoitetut menetelmät (Banverketin menetelmä ja UIC 406), ovat lähtökohtaisesti hyvin samankaltaisia. Molempien menetelmien laskentaperiaate on käytännössä sama, mikä osittain selittyy sillä, että Banverket on ollut vahvasti mukana myös UIC 406 -menetelmän kehittämisessä. Toisin kuin vanhemmassa, Banverketin menetelmässä UIC 406 ei määrittele yksiselitteisesti eri ajanjaksojen määrittämisperiaatteita. Itse asiassa UIC 406 -menetelmä jättääkin käyttäjälleen suhteellisen paljon vapautta eri osa-aikojen määrittämisperiaatteisiin. Tämän määrittelyvapautensa vuoksi UIC 406 -menetelmää voidaan käyttää erilaisten ja eritasoisten lähtötietojen kanssa. Aikojen määrittelyvapaus antaa myös laajemman mahdollisuuden käyttää hyväkseen jo käytössä olevia aikataulusohjelmia ja aikataulutietokantoja kapasiteetin käyttöasteen laskentaan. Vastaavasti kuitenkin menetelmän käyttäjältä vaaditaan enemmän asiantuntemusta, kun menetelmässä esiintyvien termien laskentaa ei ole yksiselitteisesti ohjeistettu.

Suomessa esitellyistä menetelmistä on sovellettu Banverketin menetelmää (RHK 1999), Yamagishin teoriaa (Junnila 1974 & Ronni 1994), Tawastin kaavaa (Tawast 1974 & Ronni 1994), UIC 405-menetelmää (Ronni 1994) sekä pääreitiselvityksessä käytettyä menetelmää (RHK 2004a). Näistä menetelmistä saadut kokemukset ovat olleet pääsääntöisesti positiivisia. Toisaalta esimerkiksi Junnila (1974) kyseenalaisti kaikkien sen aikaisten kansainvälisten menetelmien soveltuvuuden Suomeen, ja uskoi, että saadakseensa aikaiseksi suomalaisiin olosuhteisiin soveltuva menetelmä, on sellainen itse kehitettävä paikallisen aineiston ja kokemusten pohjalta.

Koska edellä mainituista Suomessa käytetyistä menetelmistä ja niistä saaduista kokemuksista on jo kirjoitettu suomalaisissa tutkimusraporteissa ja opinnäytetöissä, ei niitä ole tässä työssä enää sovellettu tapaustutkimuksiin. Poikkeuksena kuitenkin Banverketin menetelmä, jolla saatuja aikaisempia tuloksia (RHK 1999) on käytetty vertailuarvoina tarkasteltaessa kapasiteetin käyttöastetta tarkasteltaville rataosille.

Esitellyistä menetelmistä tapaustutkimuksiin valittiin mukaan kolme kapasiteetin laskentamenetelmää: 1970-luvulta peräisin olevat italialainen ja puolalainen menetelmä sekä tällä vuosikymmenellä kehitetty CAPACITY-malli. Kaksi ensimmäistä on valittu mukaan tarkasteluihin niiden helppokäyttöisyytensä ja pienien lähtötietomääriensä vuoksi. CAPACITY-malli on puolestaan valittu jatkotarkasteluihin, koska se edustaa uudempaa ajattelutapaa, ja se käyttää hyväkseen paljon yksityiskohtaisempia lähtötietoja kuin useat muut laskentamenetelmät. Lisäksi CAPACITY-mallin etu on se, että menetelmän tarvitsema radalla liikennöivien erilaisten junatyyppeiden määrä voidaan määrittää ilman olemassa olevaa aikataulua.

Kaikkien tapaustutkimuksiin mukaan otettavan kolmen mallin etuna on se, että niitä voidaan käyttää yksiraiteisten rataosien kapasiteettianalyseissa. Näistä puolalainen menetelmä soveltuu itse asiassa ainoastaan yksiraiteisten rataosien tarkasteluun.

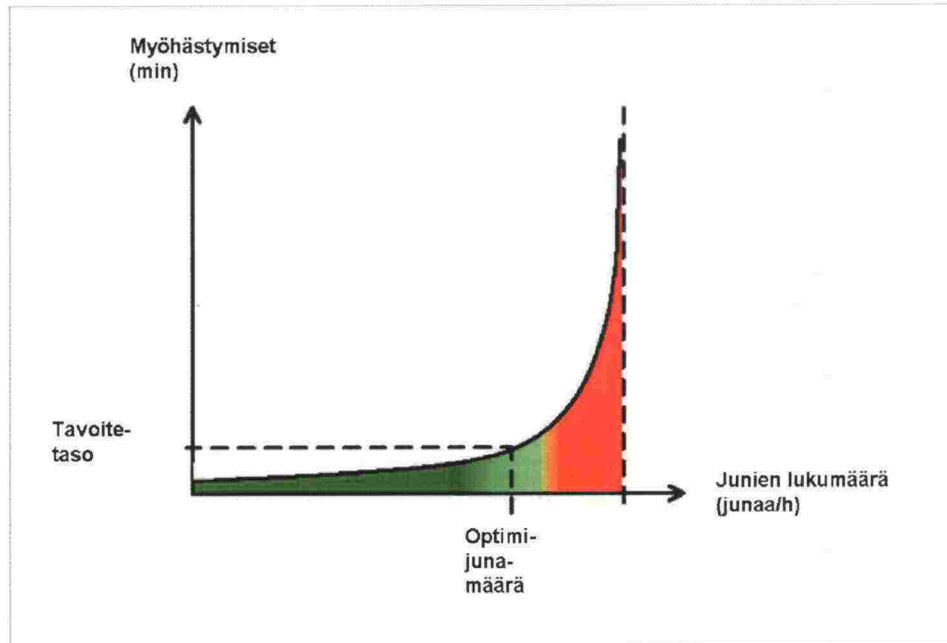
Valittujen kapasiteetin laskentamenetelmien lisäksi tapaustutkimuksissa tarkasteltaville rataosille laskettiin kapasiteetin käyttöaste vuorokauden kahdelle vilkkaimmalle tunnille. Koska Banverketin menetelmästä on jo Suomessa kokemuksia (RHK 1999), on tässä työssä kapasiteetin käyttöaste määritetty UIC 406 -menetelmän mukaisesti. Lisäksi viimeisen vuoden aikana Euroopassa saadut positiiviset kokemukset UIC 406 -menetelmästä kannustavat menetelmän käyttöönottoon myös Suomessa.

4.12 Myöhästymistilastojen analysointi

Myöhästymistilastojen analysointi eroaa muista kapasiteetin tarkastelumenetelmistä. Tässä työssä myöhästymistilastojen analysoinnin tavoitteena on selvittää junien kulun seurantajärjestelmä JUSEn hyödyntämismahdollisuudet kapasiteettitarkasteluissa. Tässä kappaleessa esiteltyjä teorioita on sovellettu tapaustutkimusten yhteydessä tämän työn kappaleessa 6.6.

Rataosalla tapahtuvien ylimääräisten viiveiden perusteella voidaan useiden eurooppalaisten tutkimusten mukaan määrittää suurimman suositeltavan liikennesuorituksen määrä. Myöhästymisaikateoria perustuu empiiriseen havaintoon sitä, että rataosalla tapahtuvien viiveiden määrä kasvaa eksponentiaalisesti junien lukumäärään lisääntyessä (Kandels & Gröger 2005). Tällaisia tutkimustuloksia on saatu muun muassa Saksassa, Itävallassa sekä Ranskassa, missä tutkimustulosta on alettu käyttää hyväksi arvioitaessa tietyn rataosan palvelutasoa. Kuvassa 29 on havainnollistettu junien lukumäärän ja rataosalla syntyvien viiveiden välinen yhteys. Lisäksi kuvaan on piirretty rataosan optimaalinen junamäärä [junaa/h], jon-

ka ylittyessä rataosan palvelutaso laskee ja viiveiden määrä rataosalla kasvaa merkittävästi (Chandesris 2005).



Kuva 29. Optimaalinen junamäärä (Kandels & Gröger 2005).

Suomessa samantapaista lähestymistä on tutkinut aiemmin Peltohaka (1972), joka arvioi työssään junamäärän kasvun vaikutusta risteysalueilla syntyneisiin viivytysaikoihin. Tarkastelun lähtökohtana toimi Kouvolan ratapihan itäpään liikenne-ennuste vuodelle 1978. Tutkimuksessa havaittiin, että viivytysajat kaksinkertaistuvat junamäärän kasvaessa 45 % ja kolminkertaistuvat junamäärän kasvaessa 80 % lähtötasosta.

Pachl (2002) on tutkinut kuvan 29 mukaista viivekäyrää ja selvittänyt optimaalisen junamäärän määrittämistä sen avulla. Hänen mukaansa suositeltavaa liikennemääräväliä rajoittavat seuraavat kaksi raja-arvoa:

1. odotusaikojen suhteellisen herkkyuden minimiarvo
2. liikenne-energian maksimiarvo

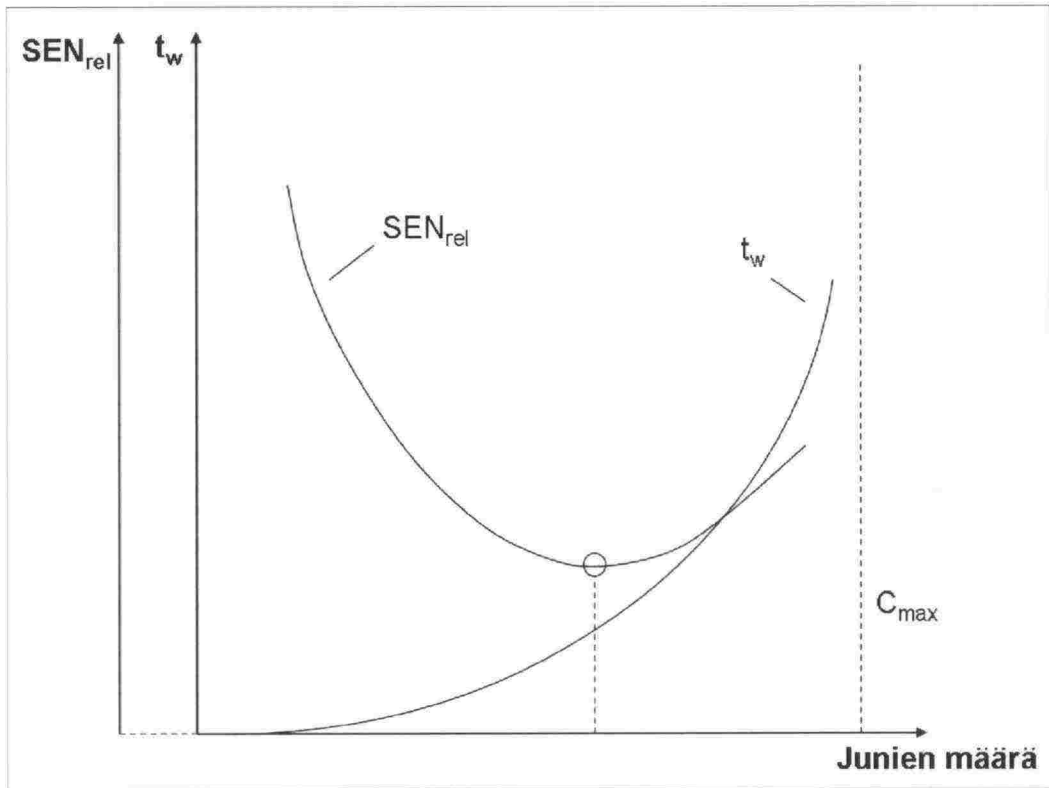
Näistä ensin mainittu, odotusaikojen suhteellinen herkkyys, lasketaan junien keskimääräisen odotusajan ja sen gradientin avulla seuraavasti (Pachl 2002):

$$SEN_{rel} = \frac{t_w'}{t_w}, \text{ missä} \quad [75]$$

SEN_{rel} = odotusajan suhteellinen herkkyys
 t_w = junien keskimääräinen odotusaika [min/juna]

t_w' = junien keskimääräisen odotusajan gradientti

Varsinaisen odotusaikakäyrän (t_w) muodosta johtuen odotusajan suhteellisen herkkyyden (SEN_{rel}) kuvaajalla on aina yksiselitteinen minimiarvo (Kuva 30). Jos liikennemäärä on korkeintaan tätä minimiarvoa vastaavan junamäärän suuruinen, jää odotusaikojen gradientti suhteellisen pieneksi, eikä liikennemäärän kasvattaminen lisää viiveitä vielä kovinkaan paljon. Jos junamäärät ovat merkittävästi tämän pisteen alapuolella, on infrastruktuuri ylimitoitettu. Tällaisen tilanteen ylläpito on harvoin taloudellisesti kannattavaa. (Pachl 2002.)



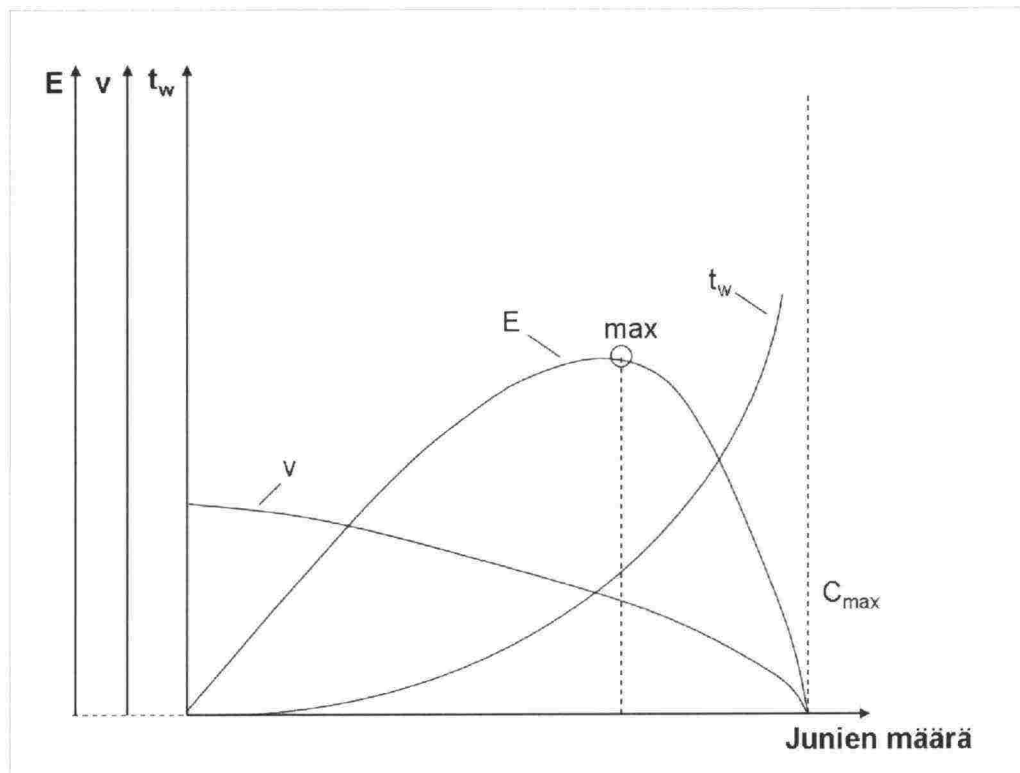
Kuva 30. Odotusaikojen suhteellinen herkkyys ja sen minimiarvo (Pachl 2002).

Toinen optimaalisen junamäärän raja-arvo, liikenne-energia, voidaan laskea fysiikan kineettisen energian periaatteiden mukaan. Radalla liikennöivät junat voidaan ajatella massana, joka liikkuu rataa pitkin nopeudella v . Kokonaisliikenne-energia voidaan siten laskea rataosanpituudella jaetun massan ja nopeuden neliön tulona. Muuntamalla liikennetiheys (junaa/km) liikennetekniikan peruskaavan avulla liikennemääräksi saadaan liikenne-energia lopulta laskettua liikennemäärän ja nopeuden tulona (kaava 76). (Pachl 2002.)

$$E_{\text{traffic}} = \frac{n}{s} \cdot v^2 = \frac{n}{t} \cdot \frac{t}{s} \cdot v^2 = \frac{n}{t} \cdot v, \text{ missä} \quad [76]$$

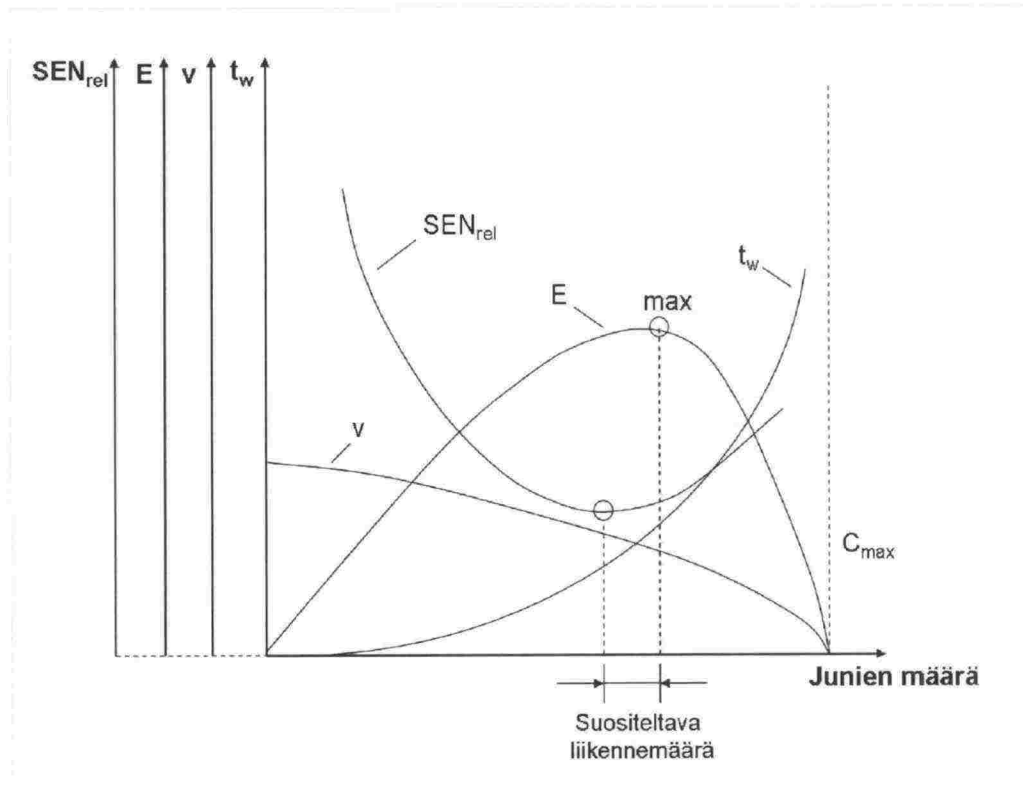
E_{traffic} = liikenne-energia
 n = junien lukumäärä
 s = rataosan pituus
 t = aika
 v = keskinopeus rataosalla

Liikenne-energian käyrällä on yksiselitteinen maksimiarvo, joka asettaa samalla ylärajan suositeltavalle liikennemääräalueelle. (Kuva 31).



Kuva 31. Liikenne-energia (Pachl 2002).

Yhdistämällä kaikki kuvien 30 ja 31 kuvaajat samaan kuvaan saadaan rataosan suositeltava liikennemääräalue määritettyä graafisesti. (Pachl 2002.)

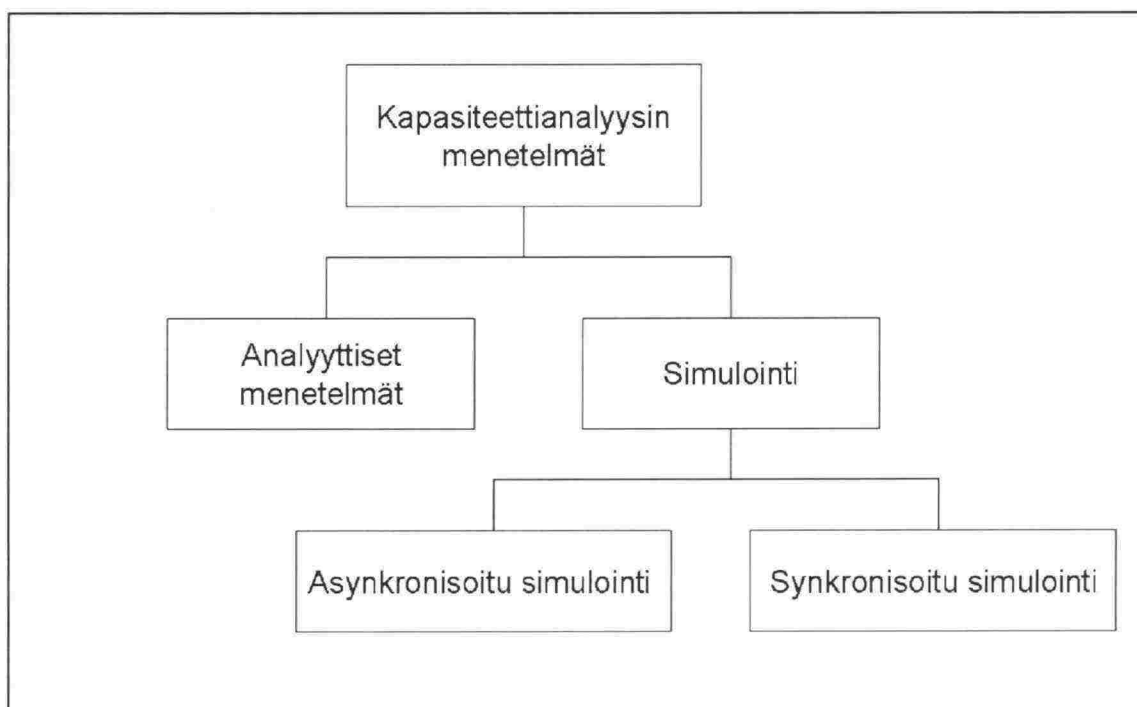


Kuva 32. Suositeltavan liikennemääräalueen määrittäminen (Pachl 2002).

Useiden eurooppalaisten simulointitutkimusten tulosten mukaan odotusaikojen suhteellisen herkkyyden perusteella määritetty suositeltavan liikennemäärän alaraja vaihtelee 50–60 prosentin välillä. Vastaavasti liikenne-energian määrittämä yläraja on tutkimuksissa vaihdellut 60–80 prosentin välillä. (Pachl 2002.)

4.13 Simulointi

Vaikka simuloinnit on rajattu tämän työn ulkopuolelle, kerrotaan tässä luvussa lyhyesti rautatiesimuloinnista ja sen potentiaalista kapasiteetilaskelmiin. Pachlin (2002) mukaan ratakapasiteetin analysointimenetelmät on mahdollista jakaa ensin kahteen ryhmään: analyttiset menetelmät ja simulointi. Lisäksi simulointimenetelmät on edelleen jaettavissa asynkronisoituihin ja synkronisoituihin simulointeihin (kuva 33). Synkronoidussa simuloinnissa junien ja vaihteiden liikkeet sekä niiden väliset vuorovaikutukset tapahtuvat mallissa samanaikaisesti. Asynkronisoidussa simuloinnissa simulointi tapahtuu puolestaan vaiheittain. Ensin mallinnetaan junien kulku tiettyjen reuna ehtojen avulla, jonka jälkeen tutkitaan miten infrastruktuuri vaikuttaa liikennöintisuunnitelmaan.



Kuva 33. Kapasiteettitarkasteluihin soveltuvat menetelmät (Pachl 2002).

Joissain yhteyksissä kapasiteetin analysointimenetelmät on jaettu kolmeen pääryhmään. Kuvasta 33 poiketen tilastolliset menetelmät muodostavat tällöin oman joukkonsa, eivätkä näin kuulu osaksi analyttisiä menetelmiä (Mattson 2005).

Simulointi soveltuu erityisesti sellaisiin tilanteisiin, joissa pohditaan ja arvotetaan kahden tai useamman suunnitteluvaihtoehdon vaikutuksia. Tällaisia arviointitilanteita ovat esimerkiksi vaihtoehtoisten infrastruktuurin hankintojen arvottaminen tai erilaisten aikataulurakenteiden toimivuuden arviointi. Toinen simuloinnin hyöty on mahdollisuus kokeilla suunnitteluvaiheessa olevien ratkaisujen toimivuutta jo ennen toteuttamispäätöstä. (Kosonen 2005.)

Jos simulointimallin rakentamis- ja analysointikustannuksia verrataan esimerkiksi radanrakennustöiden investointikustannuksiin, voidaan simulointitutkimuksia pitää verraten edullisina. Mallin avulla voidaan kokeilla suunnitteella olevan rakentamistoimenpiteestä aiheutuvia vaikutuksia, arvioida ratkaisun toimivuutta ja havaita mahdollisia ongelmia etukäteen. (Kosonen 2005.)

On kuitenkin syytä muistaa, että iso osa simuloinneista tapahtuu lähtökohtaisesti ideaalimaailmassa, jossa kalusto ei koskaan hajoa eivätkä junat myöhästele inhimillisistä erehdyksistä. Myöskään ajodynamiikka ei ole aivan identtinen todellisuuden kanssa, vaan usein junat ajavat malleissa käyttäen jatkuvasta suurinta sallittua nopeutta sekä kiihdytykset ja jarrutukset tapahtuvat usein maksimiarvoilla. (van de Stouwe & Renkema 1999.)

Simulointimalleilla voidaan tutkia esimerkiksi onnettomuus- ja häiriötilanteita, joiden toteuttaminen maastossa on käytännössä mahdotonta. Lisäksi malleihin

on usein mahdollista lisätä mukaan inhimillisestä käytöksestä aiheutuvaa hajontaa eri parametreille. Tällaisten toimenpiteiden mallintaminen vaatii kuitenkin ohjelman käyttäjältä erittäin paljon asiantuntemusta niin rautatieasioista kuin itse simulointiohjelmastakin. (Kosonen 2005.)

Analyyttisiin menetelmiin verrattuna simulointimalleilla voidaan mallintaa laajempia rataverkkoja ja useampia rinnakkaisvaikutuksia. Toisaalta keskustelu simuloinnin ja analyttisten menetelmien vastakkain asettelusta on turhaa, sillä simulointimallit perustuvat usein analyttisiin malleihin. Tietokoneiden suuri laskentateho mahdollistaa paljon monimutkaisempien yhtälöiden ja useiden rinnakkaistapahtumien laskemisen. Monet viimeaikoina tehdyistä eurooppalaisista kapasiteetilaskennoista ovat pohjautuneet ensin suoritettuihin analyttisiin laskelmiin, joiden tulokset on siirretty simulointimalliin yksityiskohtaisempia tarkasteluja varten. (Carey et al. 2005.)

Suomessa on viime vuosien aikana ollut aktiivisessa tutkimus- ja suunnittelukäytössä kaksi rautateiden simulointiohjelmää (Kosonen 2005). Vuodesta 1998 alkaen Ratahallintokeskuksella on omistanut lisenssin ruotsalaiseen SIMON-simulointiohjelman käyttöön. Lisenssiä on Ratahallintokeskuksen toimeksiantoista käytetty lähinnä VR-Rata Oy:ssä, jossa SIMON oli useamman vuoden aktiivisessa suunnittelu- ja tutkimuskäytössä (Mäkitalo 2000). Viime vuosina sen käyttö on ollut melko vähäistä ja sen on korvannut modernimpi sveitsiläinen Open Track -simulointiohjelma, joka on osoittautunut toimivaksi työkaluksi erityisesti monimutkaisten ratapihojen toimivuustarkasteluissa. (Kosonen 2005).

5 LIIKENNEPAIKKOJEN JA RATAPIHOJEN KAPASITEETTI

5.1 Yleistä

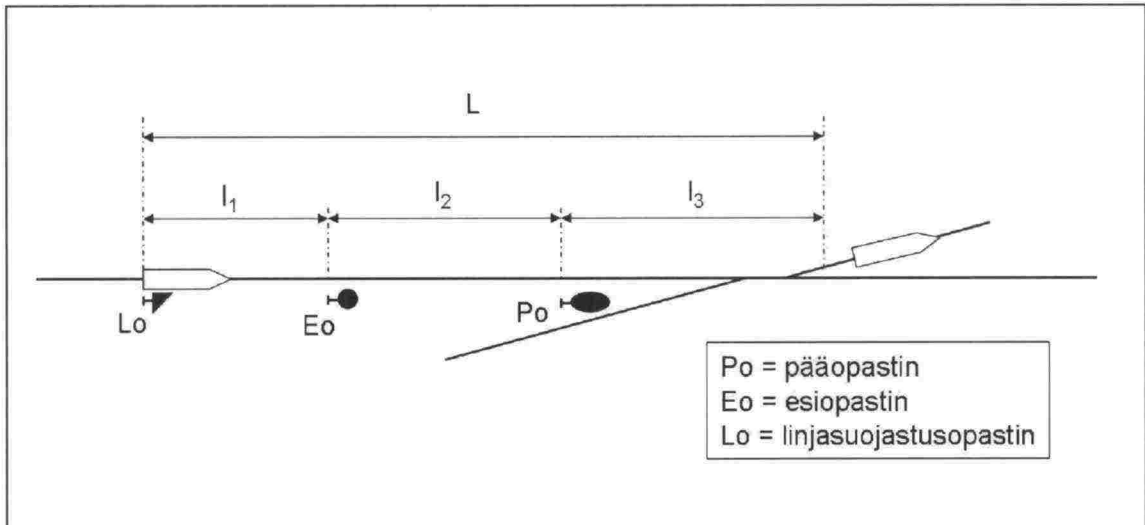
Tämän työn kappaleessa 4 esiteltiin ainoastaan sellaisia menetelmiä, joiden avulla voidaan mitata yksittäisen rataosan linjakapasiteettia. Jos rataverkon kapasiteettia halutaan tarkastella laajemmin, tulee ottaa huomioon myös ratapihojen ja liikennepaikkojen asettamat rajoitukset kapasiteetille.

Yksittäisen rataosan linjakapasiteettitarkastelu voi antaa väärän kuvan koko rataverkon tilanteesta. Esimerkiksi tarkasteltaessa tietyn rataosan kapasiteetin käyttöastetta, voidaan tulokseksi saada hyvinkin alhainen arvo. Tulos ei kuitenkaan takaa sitä, että liikenne on sujuvaa tarkasteltavaa rataosaa ympäröivällä rataverkolla, eikä sitä, ettei häiriöitä voisi syntyä esimerkiksi tarkasteltavan rataosan päissä olevilla liikennepaikoilla. (Mäkitalo 2000.)

5.2 Ratapihan kapasiteetti

Peltohaka (1972) esitteli tutkimuksessaan venäläisten kehittämän ratapihan välityskyvyn arviointiin soveltuvan menetelmän, jota hän sovelsi Kouvolan ratapihan kehittämisvaihtoehtojentarkasteluun. Menetelmä perustuu raideristeysten varausaikoihin, niistä syntyneeseen radan kuormitukseen ja edelleen junakohtaamisten todennäköisyyksien laskentaan.

Varausajalla tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä aikaa, jonka juna pitää raideristeyksen leikkauskohdan kulkureittiä varattuna. Varausaika kuvassa 34 esitetylle raideristeykselle voidaan laskea kaavalla 77 (Peltohaka 1972.)



Kuva 34. Risteyksen varautuminen (Peltohaka 1972).

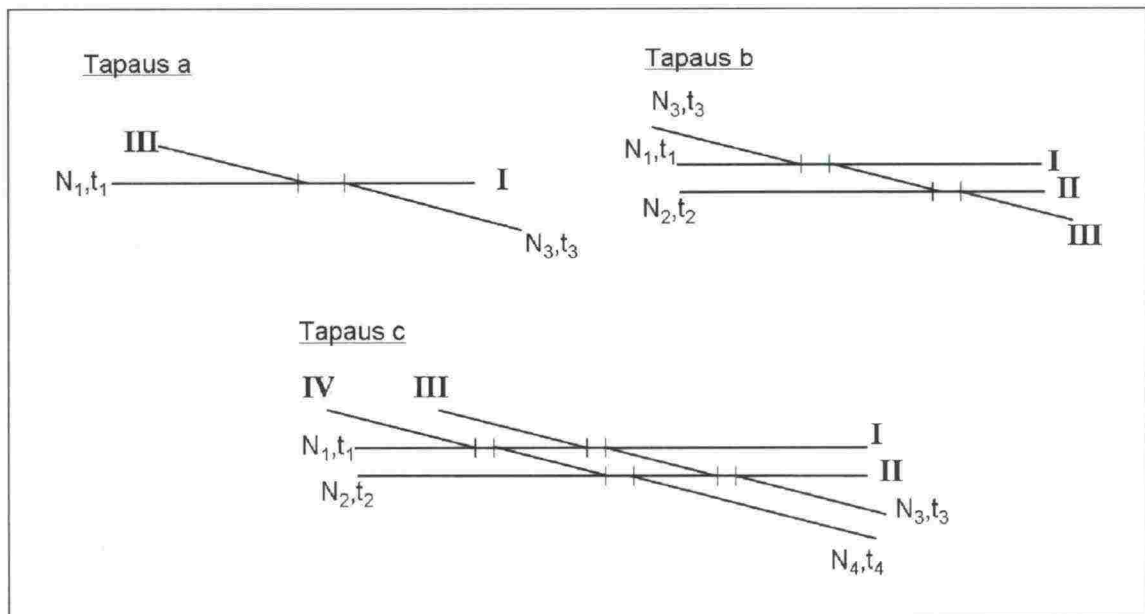
$$t = t_a + \frac{L}{16,7 \cdot v} = t_a + \frac{l_1 + l_2 + l_3}{16,7 \cdot v}, \text{ missä} \quad [77]$$

t_a = kulkutien asettamisaika (automaattisuojustuksella $t_a \leq 1$) [min]

v = junan nopeus [km/h]

l_1, l_2, l_3, L = etäisyydet kuvan 34 mukaan [m]

Näin laskettujen varausaikojen perusteella voidaan määrittää tarkasteltavan risteyskuormituskuorma. Kuvassa 35 on esitetty tavallisimpia risteämistapauksia.



Kuva 35. Yleisimmät risteilytapaukset (Peltohaka 1972).

Kuvan 35 tapaukselle a kuormitusaika voidaan laskea kaavan 78 avulla (Peltohaka 1972):

$$T_k = N_1 \cdot t_1 + N_3 \cdot t_3, \text{ missä} \quad [78]$$

- T_k = kuormitusaika tarkasteltavalla ajanjaksolla
 N_1 = junamäärä raiteella I tarkasteltavalla ajanjaksolla
 t_1 = yhden junan varausaika raiteella I
 N_3 = junamäärä raiteella III tarkasteltavalla ajanjaksolla
 t_3 = yhden junan varausaika raiteella III

Vastaavasti kuvan 35 tapauksille b ja c voidaan määrittää kaava kuormitusajanlaskemiseksi. Tällöin on kuitenkin otettava huomioon myös sellaiset tilanteet, joissa junat kulkevat samanaikaisesti raiteilla I ja II. Näin ollen esimerkiksi tapaukselle b voidaan muodostaa seuraava kaava (Peltohaka 1972).

$$T_k = N_1 \cdot t_1 + N_3 \cdot t_3 + (N_2 \cdot t_2 - T_{I-II}^{yht}), \text{ missä} \quad [79]$$

- N_i = junamäärä raiteella i tarkasteltavalla ajanjaksolla
 t_i = yhden junan varausaika raiteella i
 T_{I-II}^{yht} = Niiden tapausten kokonaisaika, jolloin junia liikennöidään samanaikaisesti raiteilla I ja II

Kaavan 79 perusteella voidaan havaita, että tapauksessa b samanaikaisesti risteykseen saapuvat raiteilla I ja II liikennöivät junat pienentävät tarkasteltavan risteysalueen kuormitusta. Jos junat liikennöivät raidetta pitkin säännöllisin väliajoin I_1 , niin todennäköisyys tällaiselle yhteensattumalle on yhtä kuin $\frac{t_1 + t_2}{I_1}$.

Kun tarkastelujaksoksi oletetaan vuorokausi (1440 min), voidaan termi I_1 korvata tekijällä $\frac{1440}{N_1}$. Näin ollen todennäköisyys sille, että raiteella II kulkeva juna kohtaa risteysalueella raiteella I kulkevan junan on

$$\frac{t_1 + t_2}{I_1} = \frac{N_1 \cdot (t_1 + t_2)}{1440}.$$

Vastaavasti todennäköisyys sille, että raiteella I kulkeva juna kohtaa risteysalueella raiteella II kulkevan junan on

$$\frac{t_1 + t_2}{I_2} = \frac{N_2 \cdot (t_1 + t_2)}{1440}.$$

Edellisessä tapauksessa odotettavien junakohtaamisten lukumäärä on N_1 ja jälkimmäisessä N_2 . Näin ollen vuorokaudessa tapahtuvien junakohtaamisten keskimääräinen lukumäärä voidaan laskea kaavalla 80. (Peltohaka 1972.)

$$N_{I-II}^{koht} = \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot (t_1 + t_2)}{1440}, \text{ missä} \quad [80]$$

N_{I-II}^{koht} = Risteysalueen junakohtausten (junat samanaikaisesti raiteilla I ja II) keskimääräinen lukumäärä vuorokaudessa
 N_i = junamäärä raiteella i tarkasteltavalla ajanjaksolla
 t_i = yhden junan varausaika raiteella i

Kun otetaan huomioon vielä erilaiset mahdollisuudet junakohtaamisen ajoitukselle (toisen raiteen juna saapuu ennen toista risteysalueelle tai junat saapuvat yhtä aikaa alueelle) sekä saapumisaikojen jakauma, voidaan junakohtaamisten keskimääräiselle kestolle johtaa seuraava kaava (Peltohaka 1972):

$$t_{keskim.I-II}^{koht} = \frac{t_1^2 + t_1 \cdot t_2 + t_2^2}{t_1 + t_2}, \text{ missä} \quad [81]$$

$t_{keskim.I-II}^{koht}$ = yhteensattuman keskimääräinen kesto
 t_i = junan varausaika raiteella i

Kun kaavalla 81 laskettu yhteensattuman kesto aika vähennetään varausaikojen t_1 ja t_2 summasta, saadaan laskettua risteysalueella sattuneen junakohtaamisen raiteilla I ja II risteyksen kuormitusaikaan aiheuttama vähennys (Peltohaka 1972):

$$(t_1 + t_2) - \frac{t_1^2 + t_1 \cdot t_2 + t_2^2}{t_1 + t_2} = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \quad [82]$$

Näin ollen kaikkien vuorokauden aikana samanaikaisesti I- ja II-raiteille yhteensattuvien junakohtaamisten aiheuttama kokonaisvähennys kuormitukseen voidaan laskea kaavalla 83 (Peltohaka 1972):

$$T_{I-II}^{YH} = \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot (t_1 + t_2)}{1440} \cdot \frac{t_1 \cdot t_2}{(t_1 + t_2)} = \frac{N_1 t_1 \cdot N_2 t_2}{1440} \quad [83]$$

Risteyksen vuorokautinen kuormitus voidaan laskea kuvan 35 tapaukselle b seuraavasti (kaava 84) (Peltohaka 1972):

$$T_k = N_1 \cdot t_1 + N_3 \cdot t_3 + \left(N_2 \cdot t_2 - \frac{N_1 t_1 \cdot N_2 t_2}{1440} \right) \quad [84]$$

Vastaavasti tapauksen c kuormitus voidaan laskea kaavalla 85 (Peltohaka 1972).

$$T_k = N_1 t_1 + N_2 t_2 - \frac{N_1 t_1 \cdot N_2 t_2}{1440} + N_3 t_3 + N_4 t_4 - \frac{N_3 t_3 \cdot N_4 t_4}{1440} \quad [85]$$

Edellä esiteltyt menetelmät antavat tulokseksi likimääräisiä arvoja. Jotta menetelmällä voitaisiin arvioida esimerkiksi junien tarkat varausajat, tulisi laskennassa ottaa huomioon kaikkien junien nopeuteen ja ajomatkoihin vaikuttavat tekijät. Tällaiseen tarkkuuteen pääseminen on kuitenkin usein vaikeaa, sillä junatyypin ominaisuudet vaihtelevat paljon ja tarkkoja lähtötietoja on vain harvoin saatavilla. (Peltohaka 1972.)

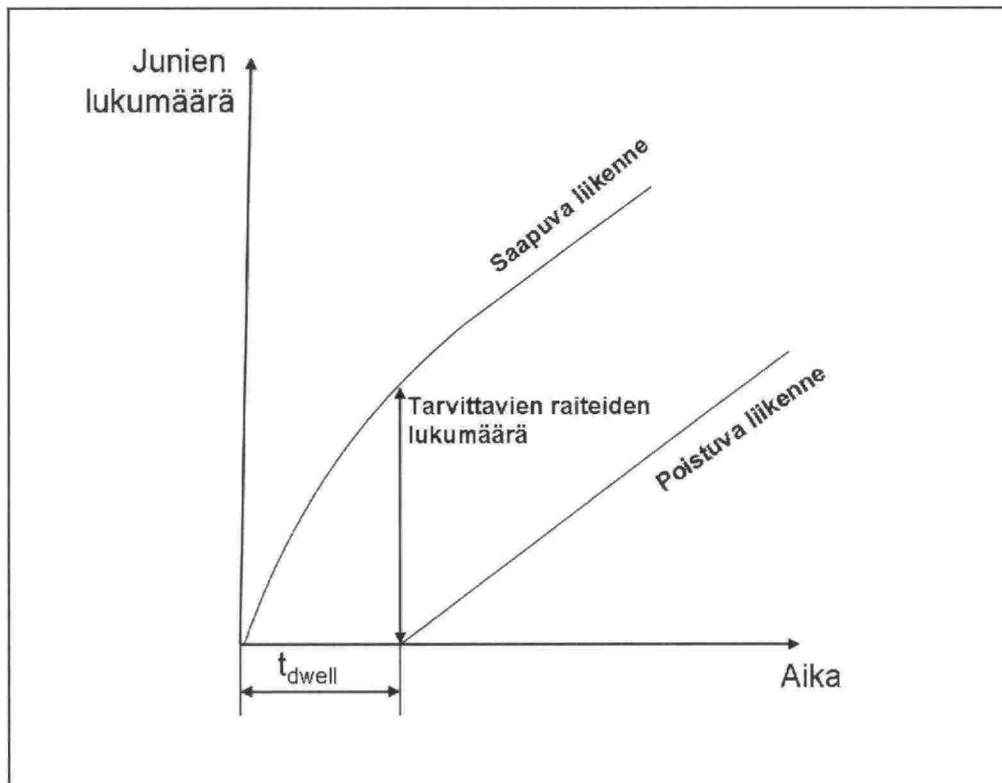
5.3 Liikennepaikan kapasiteetti

Liikennepaikan kapasiteettia on mahdollista arvioida esimerkiksi edellisessä kapaleessa esitellyllä risteystapauksiin perustuvalla kuormituslaskennalla (Peltohaka 1972). Suurin osa viimeaikoina Suomessa tehdyistä asemien toimivuus- ja kapasiteettitarkasteluista on tehty simulointi- ja aikataulusohjelmien avulla (Kosonen 2005 & Hovi 2005).

Pachlin (2002) mukaan liikennepaikan, kuten henkilöliikenneaseman tai tavararatapihan, kapasiteetti riippuu raiteiden lukumäärästä ja liikennepaikalle pysähtyvien junien pysähtymisten kestosta (kuva 36). Toisaalta tarvittavien raiteiden lukumäärä riippuu puolestaan saapuvan ja lähtevän liikenteen määrästä. Saapuvan ja lähtevän liikenteen liikennemäärien tulisikin olla keskimääräin samansuuruisia. Nämä liikennemäärät pitävät liikennepaikalta lähtevien ja saapuvien junien lisäksi sisällään myös liikennepaikan sisäisen liikenteen, kuten junien muodostamisessa käytettyjen vetureiden lukumäärän. Liikennepaikan kapasiteetin riittävyyttä voidaan arvioida kaavan 86 avulla.

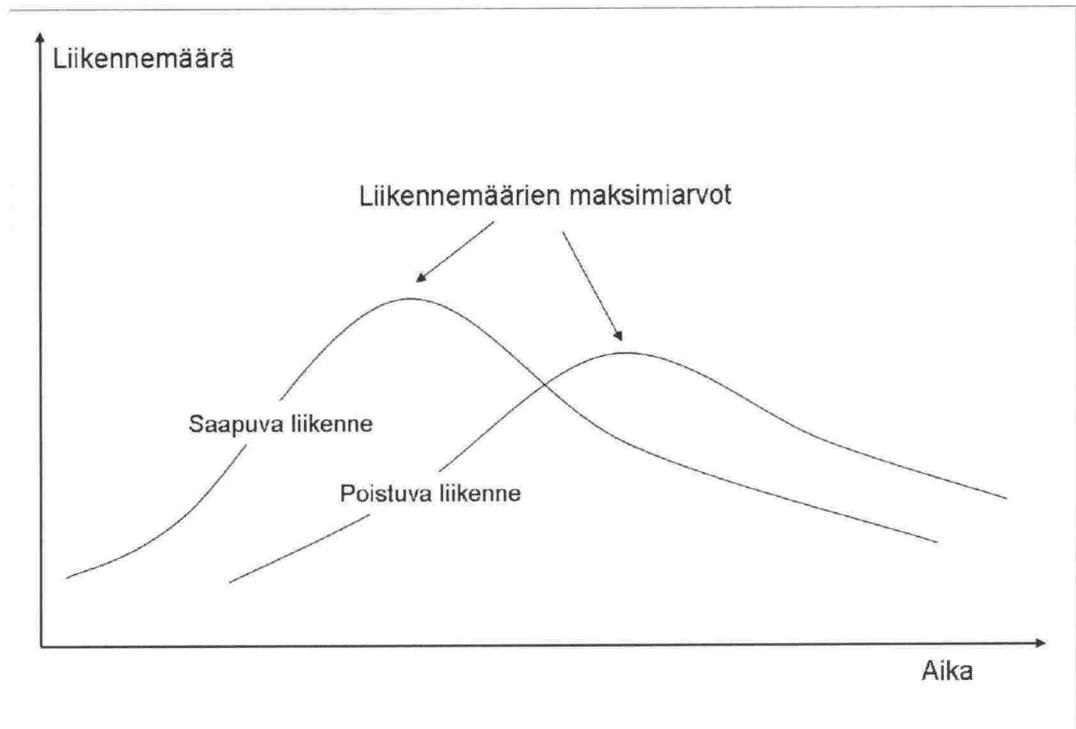
$$n_{\text{tracks,min}} = t_{\text{dwell,average}} \cdot (n_{\text{trains}}/t)_{\text{average}}, \text{ missä} \quad [86]$$

$n_{\text{tracks,min}}$ = tarvittavien raiteiden vähimmäislukumäärä
 $t_{\text{dwell,average}}$ = keskimääräisen pysähdyksen kesto liikennepaikalla
 $(n_{\text{trains}}/t)_{\text{average}}$ = keskimääräinen liikennemäärä (junaa/h)



Kuva 36. Liikennepaikalla tarvittavien raiteiden määrittäminen (Pachl 2002).

Liikennepaikalla tarvittavien raiteiden lukumäärä ei selity yksin saapuvan ja lähtevän liikennemäärän suuruuden perusteella, vaan tarkasteluissa on huomioitava myös liikennemäärien aikavaihtelut. Liikennepaikalla voi olla ajanjaksoja, jolloin saapuvan liikenteen määrä on suurempi kuin poistuvan liikenteen. Jotta ruuhkaantumiselta ja suurilta liikennehäiriöiltä välttyttäisiin, tulee liikennepaikka mitoittaa riittävän suureksi kestäämään ruuhkatuntien hetkittäiset liikennemäärien aikavaihtelut. Kuvassa 37 on havainnollistettu liikennemäärien vaihtelua huippu-tunnin aikana suurella tavararatapihalla. (Pachl 2002.)



Kuva 37. Liikennemäärien aikavaihtelua huipputunnin aikana (Pachl 2002).

5.4 Rataverkon kapasiteetti

Tähän asti tässä työssä on käsitelty ainoastaan yksittäisten rataosien, liikennepaikkojen ja ratapihojen kapasiteettia. Jos kuitenkin on tarkoituksena saada kuva koko rataverkon kapasiteetista, rataverkkoa ja sen kapasiteettia tarkasteltava yhtenä kokonaisuutena (Oksanen 2005).

Moreira et al. (2004) ovat kehittäneet menetelmää koko rataverkon kapasiteetin laskemiseksi. Heidän tavoitteensa on ollut luoda malli, joka ottaa huomioon junakohtaamisista ja reittien risteämisestä aiheutuneet viiveet. Lisäksi lopullisena tavoitteenaan he pyrkivät rakentamaan kehittämänsä mallin Suomessakin käytössä olevan VIRIATO-aikatauluohjelman päälle. Tällöin verkolliset kapasiteettitiedot saataisiin esille jo aikatauluja suunniteltaessa.

Moreiran et al. (2004) kehittämä laskentamenetelmä on monivaiheinen ja edellyttää seuraavien tulosten laskemista:

- teoreettinen maksimikapasiteetti
- käytännön kapasiteetti, kun oletetaan, että rataosalla on erinopeudella liikennöiviä tavara- ja henkilöjunia
- halutun palvelutason vaikutus kapasiteettiin
- verkollisen vaikutuksen aiheuttama vähennys kapasiteettiin

Teoreettisen maksimikapasiteetin avulla malli saa raja-arvot eri rataosien kapasiteeteille. Teoreettinen kapasiteetti saadaan laskettua pelkistettyjen kaavojen 87 (kaksiraiteiset rataosat) ja 88 (yksiraiteiset rataosat) avulla (Moreira et al 2004.)

$$L_1 = \frac{T}{d_f + m_f}, \text{ missä} \quad [87]$$

- L_1 = toisen raiteen kapasiteetti kaksiraiteisella rataosalla
 d_f = kahden peräkkäisen vuoron minimijunaväli
 m_f = ajoajan pelivara

$$L_1 = \frac{T}{\frac{t_p + s \times d_f}{s + 1} + m_f}, \text{ missä} \quad [88]$$

- L_1 = yksiraiteisen radan kapasiteetti
 t_p = kahden peräkkäisen aseman välinen ajoaika
 s = samaan suuntaan ajavien perättäisten junien odotettu lukumäärä
 d_f = kahden peräkkäisen junan minimiaikaväli
 m_f = ajoajan pelivara

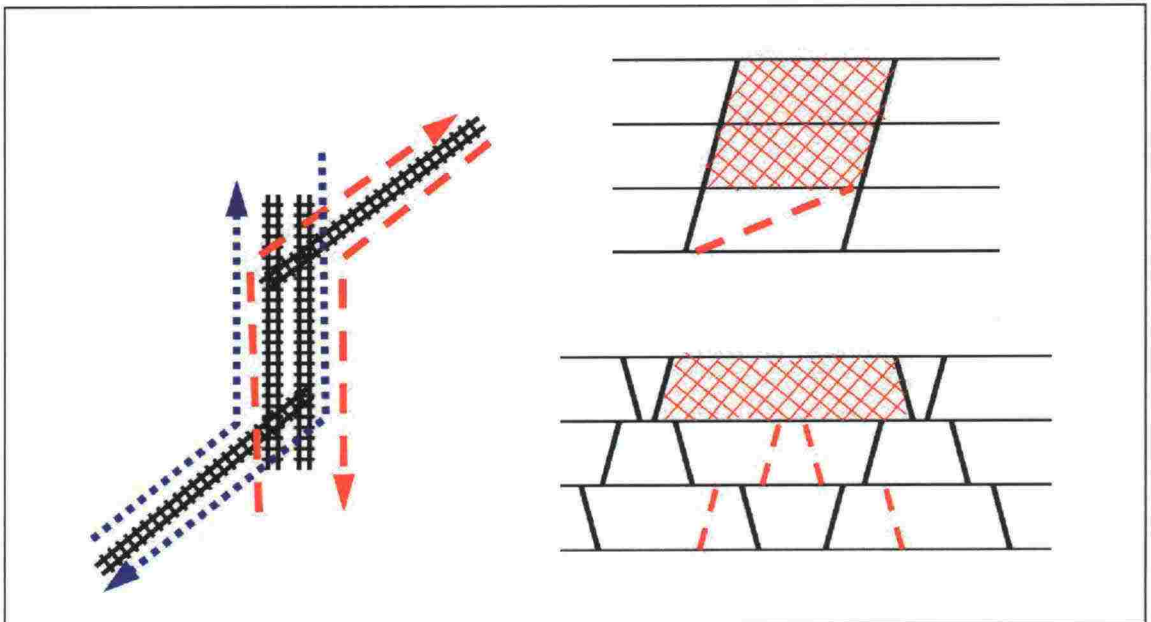
Teoreettisten raja-arvojen laskemisen jälkeen käytännön kapasiteetti määritetään CAP 1 ja CAP 2 -mallien avulla (menetelmät kuvattu tämän työn kappaleessa 4.5). Näillä malleilla saadut kapasiteetti-arvot toteutuvat kuitenkin ainoastaan, jos oletetaan, että aina nopean junan saapuessa asemalle edellä ajanut hidas juna on pysähtynyt asemalle ja odottaa siihen asti, että nopeampi juna on ohittanut sen ja jatkanut matkaa. Edellä kuvattu tilanne ei kuitenkaan toteudu aina, eikä aikataulua voida rakentaa väkisin sellaiseksi, että edellä kuvattu tilanne toistuisi siinä säännöllisesti. (Moreira et al 2004.)

Moreira et al. (2004) päättivätkin parantaa CAP 1 ja CAP2 mallien tarkkuutta lisäämällä niihin palvelutason korjaustermiä, jolla halutaan kuvata totuudenmukaisemmin junakohtausten ja niistä aiheutuvien viiveiden määrää. Korjaustermi saadaan laskettua seuraavalla kaavalla 89.

$$L_3 = \frac{T}{\sum \sum p_{kij} \times t_{kij}}, \text{ missä} \quad [89]$$

L_3	= palvelutason korjaustermi	
T	= tarkasteltava ajanjakso	
p_{kij}	= todennäköisyys tapahtumalle, jossa junatyypin j seuraa juna-	
	tyyppiä i solmussa k	
t_{kij}	= junien i ja j varaama kokonaisaika solmussa k	

Monimutkaisella rataverkolla kokonaiskapasiteetti on huomattavasti pienempi kuin yksittäisten rataosien linjakapasiteettien perusteella voidaan ymmärtää. Moreira et al. (2004) ovatkin lisänneet menetelmään korjaustermiä, joka ottaa huomioon rataverkolla tapahtuvat risteämiset ja niistä aiheutuvat kapasiteetin vähenemiset. Korjaustermiä laskenta on työläs ja siksi se määritetään simulointiohjelmien avulla. Kuvassa 38 on havainnollistettu tilanteita, joita korjaustermiä avulla pyritään selittämään. Kuvassa on esitetty kaksiraiteinen rataosa ja kaksi sitä risteävää yksiraiteista rataosaa. Lisäksi kuvan oikealla puolella on aikatauluviivojen avulla havainnollistettu rataverkon risteämisten vaikutusta rataverkon kapasiteettiin. (Moreira et al. 2004)



Kuva 38. Verkollisesta vaikutuksesta aiheutuvat kapasiteettihäviöt (verkollisen vaikutuksen takia menetetty kapasiteetti on merkitty punaisella ristikoilla) (Moreira et al. 2004).

Koko rataverkon kapasiteetin laskenta perustuu siis edellä esiteltyjen termeihin, mutta liiketaloudellisista syistä Moreira et al (2004) eivät kuitenkaan kerro

lopullista laskentakaavaa. Mallin kehitystyö on vielä kesken ja tärkeimpänä tekijänä siitä puuttuu vielä liikennepaikkojen kapasiteetti ja sen vaikutus koko rataverkon kapasiteettiin. Liikennepaikkojen kapasiteetillekin on jo kehitetty menetelmä ja se saadaan sisällytettyä malliin lähitulevaisuudessa.

Kehitteillä olevaa rataverkon kapasiteetin laskentamallia on jo kokeiltu yhdessä tapaustutkimuksessa, jossa selvitettiin Lissabonin pohjoislinjan toimivuutta. Tutkimuksen tulokset olivat erittäin lupaavia ja niiden perusteella malli on valmistuttuaan erittäin käyttökelpoinen työkalu. (Moreira et al. 2004.)

Myös Yuan & Hansen (2004) ovat tutkineet rataverkon kapasiteettiin vaikuttavia tekijöitä. Heidän määrityksen mukaan rataverkon kapasiteettia tulisi tarkastella liikennöitävien reittien solmukohtien perusteella. Teorian mukaan kapasiteetin käyttöaste voidaan tarkasteltavassa solmukohdassa laskea kaavan 90 perusteella.

$$\eta = \frac{\left(\sum_i (1 + \alpha) t_{block}^i \right)}{t_e}, \text{ missä} \quad [90]$$

η	= käyttöaste solmukohdassa aikataulutetulla liikenteellä
t_{block}^i	= junan i teoreettinen varausaika tarkasteltavalla välillä
α	= varausajan korjauskerroin
t_e	= suunnitellun aikataulun jakson pituus

6 TAPAUSTUTKIMUKSET

6.1 Yleistä tutkimuksista

Tapaustutkimuskohteiksi valittiin kaksi hyvin erilaista, mutta erittäin ajankoh-
taista yksiraiteista rataosaa: Seinäjoki–Oulu ja Luumäki–Imatra. Molempien ra-
taosien kapasiteettia on tarkasteltu neljällä erilaisella menetelmällä. Kapasiteetti-
laskennat on tehty kappaleessa 4.7.1 esitellyllä italialaisella menetelmällä, kappala-
leessa 4.8 kuvatulla puolalaisella menetelmällä sekä kappaleessa 4.6 esitellyllä
CAPACITY-mallilla. Lisäksi molempien rataosien kapasiteetin käyttöaste huip-
putunnin osalta on laskettu UIC 406 -menetelmän avulla.

Kapasiteettitarkasteluissa Luumäki–Imatra-rataosaa tarkastellaan yhtenä ko-
konaisuutena, mutta rataosa Seinäjoki–Oulu jaettiin viiteen lyhyempään tarkaste-
luväliin. Jako tehtiin sellaisilta risteysasemilta, joissa tavarajunien liikennemäris-
sä tapahtuu muutoksia. Toimenpiteen tarkoituksena on mahdollistaa rataosan ka-
pasiteetin tarkempi tarkastelu, ja helpottaa tutkimuksessa käytettävien menetel-
mien vertailua. Seinäjoki–Oulu-rataosalla on tapaustutkimuksissa jaettu seuraavaan
viiteen tarkasteluväliin, sulkuihin on kirjattu kunkin rataosan pituus:

1. Seinäjoki–Pännäinen (101,1 km)
2. Pännäinen–Kokkola (32,9 km)
3. Kokkola–Ylivieska (78,9 km)
4. Ylivieska–Tuomioja (68,2 km)
5. Tuomioja–Oulu (54,2 km)

Varsinaisten kapasiteettilaskentojen lisäksi tutkimukseen sisältyy kappalees-
sa 6.6 esitetty JUSEen kirjattujen myöhästymistapausten pohjalta tehty myöhäs-
tymistilastojen analysointi, joka perustuu kappaleessa 4.12 esiteltyyn myöhäs-
tymisaikateoriaan. Toisin kuin kapasiteettilaskennat, myöhästymistilastojen tarkas-
telututkimus suoritettiin koko Suomen rataverkolle. Tarkasteltavien rataosien
kasvattaminen oli välttämätöntä, jotta havaintomäärät saatiin riittävän suuriksi.

Tapaustutkimuskohteille Seinäjoki–Oulu ja Luumäki Imatra tehtiin yleisen
myöhästymisanalyysin lisäksi tarkempi tarkastelu, jossa vuosittaisten myöhäs-
tymistapausten määriä on verrattu toisiinsa. Tarkastelun tavoitteena on selvittää
mahdollisia muutoksia myöhästymistapausten määrässä tarkasteltavilla rataosilla
sekä arvioida, poikkeako yleisessä myöhästymistilastojen analysoinnissa käytet-

ty lähtöaineisto aikaisimpien vuosien myöhästymistilastoista. Tämän tarkastelun tulokset on esitelty kappaleessa 6.7.

6.2 Kapasiteettitarkasteluiden lähtötiedot

Laskennoissa käytetyt junamäärät, junien ajoajat sekä pysähdysten lukumäärät ja niiden kestot on molemmille tarkasteltaville rataosille määritetty tutkimusajan kohtana voimassa olevien graafisten aikataulujen perusteella Liitteissä 2 ja 4 on esitetyt pohjatietona käytetyt 5.9.2005 alkaen voimassa olevat graafiset aikataulut rataosilta Seinäjoki–Oulu ja Luumäki–Imatra. Lisäksi liitteessä 3 ja 5 on tarkasteltavilla rataosilla säännöllisesti liikennöivien tavarajunien luettelot, joiden avulla graafisista aikatauluista on määritelty analyysihin mukaan otettavat tavarajunat. Tutkimukseen otettiin mukaan vain sellaiset tavarajunat, jotka liikennöivät vähintään kolmena arkipäivänä viikossa.

Rataosien ja liikennepaikkojen väliset etäisyydet perustuvat Ratahallintokeskuksen julkaisuun ”Luettelo rautatieliikennepaikoista 1.6.2003” (RHK 2003a), jossa liikennepaikkavälien etäisyydet on laskettu peräkkäisten liikennepaikkojen kilometrijärjestelmän mukaisten sijaintien erotuksina. Näin määriteltynä kahden liikennepaikan väliseen etäisyyteen sisältyy myös liikennepaikka-alueeseen kuuluvien raiteiden pituudet. Koska tässä työssä esiteltyt kapasiteettitarkastelut suoritetaan periaatteessa ainoastaan linjaosuuksille, sisältyy kuhunkin rataosan linjapituuteen jonkin verran ylimääräistä matkaa. Tällä on todennäköisesti kuitenkin vain vähäinen vaikutus tuloksiin.

Koska menetelmän käytöstä ei ole Suomessa aiempia kokemuksia, on tässä työssä käytännön kapasiteetin kertoimen suuruudeksi oletettu 0,8. Luku ilmoittaa sen osuuden tarkasteltavasta ajanjaksosta, joka varataan liikennöinnille. Toisin sanoen näissä laskennoissa vuorokauden maksimiliikennöintiajasta 20 prosenttia on varattu muille toimenpiteille kuin varsinaiselle liikennöinnille, esimerkiksi huolto- ja kunnossapitotehtäville. Oletus perustuu Banverketin määrittelyyn (RHK 1999), jonka mukaan rataosan kapasiteetti on ylitetty silloin kun kapasiteetin käyttöaste on suurempi kuin 80 prosenttia.

6.3 Rataosan Seinäjoki–Oulu kapasiteettitarkastelut

6.3.1 Yleistä rataosasta

Luokitukseltaan Seinäjoki–Oulu-rataosa on C₁-luokan rata, jonka varrella on kaksi merkittävää risteysasemaa, Seinäjoki ja Ylivieska. Yhteensä liikennepaikkoja rataosalla on 33 kappaletta, joista 15 käytetään kaupalliseen toimintaan. Muita 18 käytetään pelkästään kohtauspaikkoina. (RHK 2004a.)

Vuonna 2003 valmistui Seinäjoki–Oulu-radan perusparannuksen tarveselvitys, jonka mukaan rataa tulisi kehittää siten, että henkilöliikenteen nopeustaso voitaisiin nostaa kalustotyyppistä riippuen nykyisestä 140 km/h:sta 160–200 km/h:iin. Lisäksi radan parannus on suunniteltu selityksessä siten, että suurin sallittu akselipaino voitaisiin nostaa nykyisestä 225 kN:ista koko radalla 250 kN:iin. (RHK 2004a.)

Rataosan yleissuunnittelu on käynnistynyt kesällä 2005, ja se valmistuu kesäkuun 2006 loppuun mennessä. Rataosan kapasiteettia tullaan suunnitelman mukaan lisäämään parantamalla olemassa olevia liikennepaikkoja ja lisäämällä kaksoisraideosuuksia liikennöinnin kannalta ongelmallisimmille osuuksille. (Kosonen 2005)

Kapasiteetin ja aikataulusuunnittelun kannalta suurimman haasteen muodostavat koko rataosan läpi liikennöivien junien suuri osuus, minkä takia rataosan liikenne on hyvin häiriöherkkä (Kosonen 2005). Lisäksi rataosalla on muun muassa kuusi sellaista kohtauspaikkaväliä, joiden pituus on yli 13 km. Tällaiset välit ovat rataosan pullonkauloja ja pienentävät ratakapasiteetin määrää. Taulukossa 2 on esitetty rataosan Seinäjoki–Oulu liikennepaikkavälit ja niiden pituudet.

Taulukko 2. Liikennepaikkojen väliset etäisyydet rataosalla Seinäjoki–Oulu (taulukon apuviivat havainnollistavat tapaustutkimusten tarkasteluvälijakoa) (RHK 2003a).

Liikennepaikaväli	Välin pituus [km]
Seinäjoki–Ruha	15,688
Ruha–Lapua	7,966
Lapua–Rajaperkiö	7,367
Rajaperkiö–Kauhava	7,283
Kauhava–Raunio	8,922
Raunio–Härmä	8,242
Härmä–Voltti	6,445
Voltti–Köykäri	7,177
Köykäri–Jepua	9,208
Jepua–Kovjoki	13,137
Kovjoki–Pännäinen	9,680
Pännäinen–Kolppi	6,579
Kolppi–Kruunupyy	12,490
Kruunupyy–Kokkola	13,872
Kokkola–Matkaneva	10,623
Matkaneva–Kälviä	6,085
Kälviä–Riippa	9,921
Riippa–Kannus	13,520
Kannus–Eskola	12,182
Eskola–Sievi	9,807
Sievi–Karhukangas	7,917
Karhukangas–Ylivieska	8,830
Ylivieska–Kangas	12,119
Kangas–Oulainen	15,387
Oulainen–Kilpua	11,062
Kilpua–Vihanti	15,667
Vihanti–Tuomioja	13,935
Tuomioja–Ruuki	6,727
Ruuki–Hirvineva	10,182
Hirvineva–Liminka	12,987
Liminka–Kempele	12,597
Kempele–Oulu	11,706

6.3.2 Rataosan linjakapasiteetin laskennat

Puolalainen menetelmä

Ensimmäisenä rataosan Seinäjoki–Oulu linjakapasiteetti laskettiin kappaleessa 4.8 esitellyllä suhteellisen yksinkertaisen 1970-luvulta käytössä olleen puolalaisen menetelmän avulla. Ennen varsinaista laskentaa tarkasteltava rataosa päätettiin jakaa viiteen lyhyempään väliin. Kullekin välille määriteltiin omat lähtöarvot ja laskettiin sekä teoreettinen että käytännön vuorokausikapasiteetti. Kapasiteettilaskennassa käytetyt lähtöarvot ja lopputulokseksi saadut kapasiteetti-arvot on esitetty taulukossa 3. Käytännön kapasiteetti on saatu kertomalla teoreettinen mak-

simiarvo Banverketin määrittämällä suurimman sallitun käyttöasteen suositusarvolla (RHK 1999).

Taulukko 3. Puolalaisessa menetelmässä käytetyt lähtötiedot sekä kapasiteettilaskennan tulokset.

Rataosa	Kriittinen kohtauspaikkaväli	Kriittisen välin pituus (km)	Henkilöjunien ajoaika kriittisellä välillä, t1 (min)	Tavarajunien ajoaika kriittisellä välillä, t2 (min)	Keskimääräiset odotusajat, d1 ja d2 (min)	Teoreettinen kapasiteetti (junaa/vrk)	Käytännön kapasiteetti (junaa/vrk)
Seinäjoki-Pännäinen	Seinäjoki-Ruha	15,1	9	12	1,5	120	96
Pännäinen-Kokkola	Kruunupyy-Kokkola	13,9	8,5	11	1,5	128	102
Kokkola-Ylivieska	Riippa-Kannus	13,5	8	11	1,5	130	104
Ylivieska-Tuomioja	Kilpua-Vihanti	15,7	9,5	12,5	1,5	116	93
Tuomioja-Oulu	Hirvineva-Liminka	13	8	10,5	1,5	134	107

Taulukosta 3 nähdään, että puolalaisen menetelmän mukaan rataosan Seinäjoki–Oulu käytännön kapasiteetin arvot vaihtelevat välillä 93–107 junaa/vrk. Menetelmällä saadut tulokset ovat yllättävän suuria, etenkin kun huomioidaan, että puolalainen menetelmä perustuu oletukseen siitä, että joka toinen juna liikennöi vastakkaiseen suuntaan. Tämän lähtöoletuksen perusteella olisi ollut perusteltua olettaa, että menetelmällä saatavat tulokset olisivat korkeintaan samansuuruisia kuin rataosan nykyiset liikennemäärät. Taulukossa 3 esitetyt käytännön kapasiteetin arvot ovat kuitenkin noin kaksinkertaisia nykyisiin liikennemääriin verrattuna.

Koska jokaisessa tapauksessa keskimääräiset odotusajat on määritelty yhtä suuriksi, selittyvät rataosakohtaiset erot kapasiteettiarvoissa kriittisten kohtauspaikkavälien pituuksilla ja niihin kuuluvien ajoajoilla. Taulukossa 3 kapasiteetti vähenee lähes lineaarisesti kohtauspaikkavälin kasvaessa, koska junatyypin ja nopeusjakaumat pysyvät lähes vakioina koko rataosalla.

Italialainen menetelmä

Rataosan Seinäjoki–Oulu linjakapasiteetti laskettiin myös 1970-luvun italialaisella menetelmällä, joka perustuu edellä käytetyn puolalaisen menetelmän tavoin kriittisen kohtauspaikkavälin ajoaikoihin. Tämä menetelmä ottaa kuitenkin huomioon myös junien keskimääräisen pysähdyksen keston. Menetelmässä käytetyt lähtöarvot ja kapasiteettilaskennan tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Italialaisessa menetelmässä käytetyt lähtötiedot sekä kapasiteettilaskennan tulokset

Rataosa	n (junaa)	n' (junaa)	p (min)	p' (min)	i (min)	f	Teoreettinen kapasiteetti (junaa/vrk)	Käytännön kapasiteetti (junaa/vrk)
Seinäjoki-Pännäinen	24	13	9	12	10	80,00 %	51	41
Pännäinen-Kokkola	24	19	8,5	11	5	80,00 %	88	70
Kokkola-Ylivieska	21	20	8	11	14	80,00 %	57	45
Ylivieska-Tuomioja	20	18	9,5	12,5	16	80,00 %	49	40
Tuomioja-Oulu	20	18	8	10,5	3	80,00 %	97	77

Taulukosta 4 nähdään, että kapasiteettilaskennan tuloksissa on suurta vaihtelua rataosien välillä. Pienin käytännön kapasiteetin arvo saadaan välillä Seinäjoki-Pännäinen, 41 junaa/vrk, ja suurin välillä Tuomioja-Oulu, 77 junaa/vrk. Syy suureen vaihteluun selittyy erisuuruksilla keskimääräisen pysähdyksen keston arvoilla. Tämä arvo on yhteinen kaikille rataosalla liikennöiville junille, mikä aiheuttaa mallin vääristymistä sellaisilla rataosilla, joissa yksi tai useampi tavarajuna väistää pitkäksi aikaa muuta liikennettä. Menetelmä ei osaa käsitellä näitä tapauksia oikein, vaan se olettaa näiden kohtaauspaikalla odottavien junien varaavan linjakapasiteettia. Tulosta voitaisiin korjata poistamalla lähtötiedoista osa pysähdyksistä, mutta on vaikeaa määrittää, mitkä pysähtymistapaukset tulee ottaa mukaan malliin ja mitkä ei.

Jos keskimääräinen pysähdyksen kesto i määriteltäisiin kaikille rataosille korkeintaan 5 minuutin suuruiseksi, olisivat tällä menetelmällä saadut käytännön kapasiteetin tulokset kauttaaltaan noin 30–40 junaa/vrk pienempiä kuin puolalaisen menetelmän vastaavat.

CAPACITY-malli

Tapaustutkimukseen mukaan otetuista kapasiteetin malleista monipuolisin on CAPACITY-malli, joka tarvitsee paljon lähtötietoja laskennan suorittamiseksi. CAPACITY-mallin tarvitsemat yleiset lähtöarvot kullekin rataosalla on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. CAPACITY-mallin yleiset lähtötiedot rataosalla Seinäjoki-Oulu

Rataosa	Tarkastelu-aika (min)	Rataosan pituus, L (km)	Pisimmän kohtaus- paikka- välin pituus (km)	Suurin sallittu kapasiteetin käyttöaste (%)	Pelivaran korjaus- kerroin, dm	Operointi- aikojen korjaus- kerroin, dt	Keskimääräinen opastin-väli rataosalla	Raiteiden lukumäärä
Seinäjoki-Pännäinen	1440	101,1	15,1	80	1,0	1,0	3,5	1
Pännäinen-Kokkola	1440	32,9	13,9	80	1,0	1,0	3,5	1
Kokkola-Ylivieska	1440	78,9	13,5	80	1,0	1,0	3,5	1
Ylivieska-Tuomioja	1440	68,2	15,7	80	1,0	1,0	3,5	1
Tuomioja-Oulu	1440	54,2	13	80	1,0	1,0	3,5	1

Yleisten lähtötietojen lisäksi CAPACITY-malli tarvitsee jokaisen rataosan jokaiselle junatyypille omat tyyppikohtaiset lähtöarvot. Nämä arvot on esitetty rataosittain taulukossa 6. Taulukossa esiintyvien lähtöarvojen lisäksi laskentaa tarkennettiin siten, että se soveltuisi paremmin yksiraiteisten rataosien tarkasteluun. Tämä tehtiin lisäämällä sellaisille tapauksille, joissa vastakkaiseen suuntaan ajava juna seuraa toiseen suuntaan ajavaa junaa, korjaustermi, joka on rataosan kriittisen kohtauspäikkävälän ajoajan suuruinen. Vastaavasti sellaisille tapauksille, joissa peräkkäiset junat ajavat samaan suuntaan, lisättiin korjaustermi, joka on rataosan opastinväliin kuluvan ajoajan suuruinen.

Taulukko 6. CAPACITY-mallissa käytetyt junatyypikohtaiset lähtötiedot (n = junien lukumäärä, v = ajonopeus, na = pysähdysten lukumäärä ta = keskimääräinen pysähdysten kesto, m = pelivara (%), d = operointiaikojen korjauskerroin)

Rataosa		Pendolino pohjoiseen	IC-junat pohjoiseen	Pikajuna pohjoiseen	Tavarajunat pohjoiseen	Pendolino etelään	IC-junat etelään	Pikajunat etelään	Tavarajunat etelään
Seinäjoki-Pännäinen	n	3	3	3	7	3	3	3	7
	v	110	95	90	75	110	95	90	75
	na	1	2	3	2	0	1	2	2
	ta	2	2	3,5	3,5	0	2	3	6
	m	10	10	10	10	10	10	10	10
Pännäinen-Kokkola	d	1	1	1	1	1	1	1	1
	n	3	3	3	7	3	3	3	8
	v	110	95	90	75	110	95	90	75
	na	1	1	1	1	0	1	1	1
	ta	1	2	3	4	0	2	4	4
Kokkola-Ylivieska	m	10	10	10	10	10	10	10	10
	d	1	1	1	1	1	1	1	1
	n	3	3	3	14	3	3	3	13
	v	110	95	90	75	110	95	90	75
	na	1	2	2	2	1	2	2	2
Ylivieska-Tuomioja	ta	3	2,5	6	6	2	2,5	4	9
	m	10	10	10	10	10	10	10	10
	d	1	1	1	1	1	1	1	1
	n	3	3	3	10	3	3	3	10
	v	110	95	90	75	110	95	90	75
Tuomioja-Oulu	na	1	2	2	2	1	2	2	2
	ta	2	3	4	15	2	3	5,5	9
	m	10	10	10	10	10	10	10	10
	d	1	1	1	1	1	1	1	1
	n	3	3	3	10	3	3	3	9
Seinäjoki-Oulu	v	110	95	90	75	110	95	90	75
	na	0	0	1	2	0	1	1	2
	ta	0	0	2,0	4,5	0	2	3	2,5
	m	10	10	10	10	10	10	10	10
	d	1	1	1	1	1	1	1	1

Taulukoissa 5 ja 6 esiintyvien lähtötietojen perusteella sekä kappaleessa 4.6 esiintyvien kaavojen 34–41 avulla saatiin laskettua kunkin rataosan sekä teoreettinen että käytännön kapasiteetti. Teoreettisen kapasiteetin arvot laskettiin syöttämällä suurimmaksi sallituksi kapasiteetin käyttöasteeksi 100 prosenttia. Kapasiteetilaskentojen tulokset rataosalle Seinäjoki-Oulu on esitetty rataosittain taulukossa 7.

Taulukko 7. *CAPACITY-mallin tulokset rataosalle Seinäjoki–Oulu*

Rataosa	Käytännön kapasiteetti (junaa/vrk)	Teoreettinen kapasiteetti (junaa/vrk)
Seinäjoki-Pännäinen	81	101
Pännäinen-Kokkola	130	163
Kokkola-Ylivieska	91	114
Ylivieska-Tuomioja	73	91
Tuomioja-Oulu	108	135

Taulukosta 7 havaitaan, että verrattuna puolalaisen sekä erityisesti italialaisen menetelmän tuloksiin CAPACITY-mallilla saadut kapasiteettiarvot ovat suuria. Lisäksi tulosten rataosakohtaisen vaihtelun havaitaan olevan todella suurta, erityisesti kun otetaan huomioon tarkasteltavien rataosien liikenteellinen ja rata-geometrinen samankaltaisuus. CAPACITY-mallin ongelmana onkin todennäköisesti se, että liikennöinti tapahtuu siinä täysin ideaaleissa olosuhteissa ja se olettaa junaparien varaavaan rataosaa paljon todellista vähemmän. Koska malli sisältää useita muuttujia, voidaan tulosta todennäköisesti parantaa lähtöarvoja ja korjauskertoimia tarkentamalla. Muuttujien suuri määrä tekee kuitenkin mallin kalibroinnista haasteellisen tehtävän.

6.3.3 Kapasiteetin käyttöasteen laskenta UIC-406 menetelmällä

Edellisessä kappaleessa esiteltujen kapasiteettilaskentojen lisäksi Seinäjoki–Oulu-rataosaa arvioitiin myös UIC 406 -kapasiteetin käyttöasteen laskentamenetelmällä.

Kapasiteetin käyttöasteen laskennassa käytetyt lähtötiedot ja menetelmällä saadut tulokset on esitetty rataosittain taulukossa 8. Kapasiteetin käyttöasteen laskenta tehtiin kolmella eri oletuksella: kunnossapidolle varattiin tarkasteltavasta kahdesta tunnista 0, 5 ja 10 minuuttia.

Taulukko 8. *UIC 406 –menetelmän laskemissa käytetyt lähtöarvot, sekä kapasiteetin käyttöasteet tilanteissa, joissa kunnossapitoaika on 0, 5 ja 10 minuuttia*

Kriittinen rataosa	Vuorokauden vilkkain kaksituntinen	Junien luku- määrä	Junien kokonais- ajoaika (min)	Pelivara (=10% ajoajasta)	Junakohtauk- sista aiheutuva aikalisä (2min/juna)	Kapasiteetin käyttöaste, kun kunnossapidolle varataan		
						0 min	5 min	10 min
Seinäjoki-Pänninen	1:00-3:00	5	56	5,6	10	59,7 %	63,8 %	68,0 %
Pänninen-Kokkola	2:00-4:00	5	62	6,2	10	65,2 %	69,3 %	73,5 %
Kokkola-Ylivieska	2:00-4:00	7	77	7,7	14	82,3 %	86,4 %	90,6 %
Ylivieska-Tuomioja	7:30-9:30	5	68	6,8	10	70,7 %	74,8 %	79,0 %
Tuomioja-Oulu	19:00-21:00	5	64	6,4	10	67,0 %	71,2 %	75,3 %

Ratahallintokeskuksen vuonna 1999 teettämässä tutkimuksessa (RHK 1999) saatiin Banverketin menetelmällä laskettua vastaaville rataosille seuraavat huipputunnin kapasiteetin käyttöasteet:

- Seinäjoki–Pännäinen: 52 %
- Pännäinen–Kokkola: 55 %
- Kokkola–Ylivieska: 58 %
- Ylivieska–Tuomioja: 60 %
- Tuomioja–Oulu: 55 %

Verrattaessa vuonna 1999 saatuja tuloksia nyt saatuihin arvoihin havaitaan, että kapasiteetin käyttöaste on järjestelmällisesti kasvanut rataosilla noin 10 prosenttia lukuun ottamatta rataosaa Kokkola–Ylivieska, jolla kapasiteetin käyttöaste on kasvanut peräti 24 prosentilla. Yleinen, noin 10 prosentin kasvu kapasiteetin käyttöasteessa selittyy rataosan kasvaneella henkilöjunien määrällä, mutta rataosan Kokkola–Ylivieska merkittävästi suurempi kasvu selittynee ainoastaan sillä, että tässä tarkastelussa käytetty aikataulu on vuorokauden kahden vilkkaamman tunnin ajalta rakennettu aikaisempaa tiiviimmäksi. Jos tarkastelussa olisi laskettu rataosan kapasiteetin käyttöasteet myös koko vuorokaudelle, ei Kokkola–Ylivieska olisi todennäköisesti erottunut muista rataosista näin merkittävästi.

6.4 Rataosan Luumäki–Imatra kapasiteettitarkastelut

6.4.1 Yleistä rataosasta

Vilkkaiden ratapihojensa takia rataosa Luumäki–Imatra T (tavara) on yksi Suomen vilkkaimmista yksiraiteisista osuuksista (RHK 2002b).

Rataosan Luumäki–Lappeenranta perusparannustyöt aloitettiin vuonna 2000. Hankkeeseen sisältyy päällysrakenteen uusimisen lisäksi turvalaitteiden uusiminen ja liikennepaikkamuutosten tekeminen Lappeenrannan ja Parikkalan väliselle rataosalle. Viimeksi mainituilla toimenpiteillä pyritään lisäämään ajoittain täysin käytössä olevaa kapasiteettia. Rataosalle Lappeenranta–Imatra uudet turvalaitteet asennettiin vuoden 2004 aikana. Koko perusparannushankkeen on määrä valmistua vuoden 2008 aikana. (Ronni 2005 & Manninen 2005.)

Vuoden 2005 aikana valmistuu RHK:n teettämä selvitys: ”Rautateiden tavaraliikenteen muutosten hallinta Kaakkois-Suomessa”. Selvityksessä arvioidaan alueen rataverkon liikennemäärien muutoksesta aiheutuvia infrastruktuurin kehit-

tämistarpeita. Lisäksi selvityksessä määritellään eri parannustoimenpiteiden kii-
reellisyysjärjestys. (Ronni 2005.)

Alustavien tutkimustulosten perusteella kapasiteetin kannalta ongelmaksi voi muodostua Venäjän esittämä vaihtoehto, jonka mukaan iso osa tällä hetkellä Vainikkalan kautta kulkevista tavarajunista siirrettäisiin kulkemaan Imatrankosken kautta. Toteutuessaan edellä kuvattu tilanne lisää entisestään rataosan Luumäki–Imatra rakennuspaineita. Rataosan nykyinen kapasiteetti on arvioitu riittämättömäksi esitetyn liikennöintivaihtoehdon aiheuttamalle lisäliikenteelle. (RHK 2005a & Kosonen 2005.)

Rataosan Luumäki–Imatra liikennepaikkavälit ja niiden pituudet on esitetty taulukossa 9. Kapasiteetin kannalta rataosan kriittisin liikennepaikkaväli on Joutseno–Rauha, jonka pituus on 12,7 km. Väli on selvästi pisin rataosalla ja tämän välin parantaminen tulee olemaan toimenpidesuositusten kärjessä. (Kosonen 2005.)

Taulukko 9. Liikennepaikkojen väliset etäisyydet rataosalla Luumäki–Imatra (RHK 2003a).

Liikennepaikkaväli	Välin pituus [km]
Luumäki–Rasinsuo	7,972
Rasinsuo–Törölä	7,009
Törölä–Tapavainola	4,886
Tapavainola–Lappeenranta	7,398
Lappeenranta–Lauritsala	4,208
Lauritsala–Muukko	5,180
Muukko–Joutseno	8,694
Joutseno–Rauha	12,669
Rauha–Imatra	5,488

Vuonna 2002 valmistuneen RHK:n tilaaman selvityksen ”Luumäki–Imatra T kaksoisraideselvitys” (RHK 2002b) mukaan ratakapasiteetti väleillä Lauritsala–Joutseno ja Joutseno–Imatra T on huipputunnin aikana täysin käytössä. Tilanteen ei myöskään odoteta paranevan ilman uusia ratainvestointeja, sillä tavaraliikenteen määrän on ennustettu kasvavan lähitulevaisuudessa koko rataosalla alueen perusteollisuuden kasvun myötä.

6.4.2 Kapasiteetilaskennat

Puolalainen menetelmä

Kaavassa 52 esiintyvät ajoajat, t_1 ja t_2 , on määritelty voimassa olevien graafisten aikataulujen pohjalta. Laskennoissa käytetty aikataulu on ollut voimassa 5.6.2005 alkaen ja ne löytyvät tämän työn liitteenä 4. Ajoaikojen arvot on määritelty siten, että t_1 on kaukoliikenteen henkilöjunien ja t_2 tavarajunien ajoaikojen keskiarvo rataosan kriittisellä välillä.

Rataosan Luumäki–Imatra kriittinen kohtaupaikkaväli on Joutseno–Rauha, jonka pituus on 12,7 km. Tällä välillä henkilöjunien ajoaika t_1 on keskimäärin 8 minuuttia ja tavarajunien ajoaika t_2 12 minuuttia. Kappaleen 4.8 kaavassa 52 esiintyvät odotusajat d_1 ja d_2 on molemmat arvioitu graafisen aikataulun perusteella 2 minuutiksi. Näillä lähtöarvoilla rataosan kapasiteetiksi saadaan puolalaisella menetelmällä rataosan Luumäki–Imatra teoreettiseksi kapasiteetiksi 120 junaa/vrk.

Kuten kappaleessa 4.8 todettiin, on saatu luku kerrottava korjauskertoimella, jotta tulokseksi saadaan rataosan käytännön kapasiteetti. Käyttämällä korjauskertoimena Banverketin maksimikapasiteetin raja-arvoa käytännön kapasiteetiksi saadaan:

$$N = N' \cdot 0,80 = 120 \text{ junaa} \cdot 0,80 = 96 \text{ junaa}$$

Menetelmän kapasiteettia vähentävästä lähtöoletuksesta (junat liikennöivät vuorotellen vastakkaisiin suuntiin) huolimatta edellä esitetyt teoreettisen ja käytännön kapasiteetin tulokset ovat todella suuria. Tämä voidaan todeta esimerkiksi vertaamalla nykyistä junamäärää edellä saatuihin tuloksiin. Nykyisen 5.6.2005 voimaantulleen aikataulun mukaan rataosalla liikennöi keskimääräisenä arkipäivänä 59 junaa. Nyt saatu käytännön kapasiteetti on lähes 40 junaa/vrk suurempi ja teoreettinen kapasiteetti lähes kaksinkertainen nykyisiin junamääriin verrattuna.

Vaikka menetelmällä saadut absoluuttiset arvot ovat virheellisiä, voi menetelmällä olla silti käyttöä erilaisten vaihtoehtojen vertailussa. Menetelmällä saatujen tulosten perusteella voidaan tarkastella esimerkiksi kohtaupaikkavälin lyhentämisen tai nopeamman kaluston käyttöönoton suhteellista vaikutusta ratakapasiteettiin. Puolalaisen menetelmän selviä etuja ovat menetelmän helppokäyttöisyys ja vaadittavien lähtötietojen vähäinen määrä.

Italialainen menetelmä

Italialaisen menetelmän lähtötiedot perustuvat vastaaviin oletuksiin ja periaatteisiin kuin edellä esitetyn puolalaisen menetelmän. Myös tässä tapauksessa kriittisen kohtauspakkavälin ajoajat n ja n' on määritelty henkilö- ja tavarajunien keskimääräisten ajoaikojen perusteella. Koska menetelmä olettaa keskimääräisen odotusajan $i:n$ yhtä suureksi kaikille junatyypeille, on sen arvo määritelty graafisen aikataulun perusteella. Näin keskimääräiseksi odotusajaksi rataosalla on määritelty 5 min. Myös tavana- ja henkilöjunien lukumäärät on määritelty 5.6.2005 alkaen voimassa olleen graafisen aikataulun perusteella. Tavarajunista mukaan on otettu vain sellaiset vuorot, jotka liikennöivät vähintään kolmena arkipäivänä. Näin henkilöjunien lukumääräksi on saatu 12 junaa/vrk ja tavarajunien 47 junaa/vrk. Kun kunnossapitotöille varattu aika t määritetään Junnilan (1974) esittämän ohjeen mukaisesti 90 minuutiksi, saadaan teoreettiseksi kapasiteetiksi:

$$P = 82 \text{ junaa/vrk},$$

ja korjauskertoimella käytännön kapasiteetiksi:

$$P^* = 82 \text{ junaa/vrk} \cdot 0,80 = 66 \text{ junaa/vrk}.$$

CAPACITY-malli

CAPACITY-mallia varten Luumäki–Imatra -rataosan junat jaettiin tavarajuniksi ja henkilöjuniksi. Kummallekin kategorialle määriteltiin tämän jälkeen voimassa olevan graafisen aikataulun molemmille kulkusuunnille seuraavat lähtötiedot:

- junien lukumäärät ajosuunnittain:
 - henkilöjunat Luumäeltä: 6 junaa/vrk
 - henkilöjunat Imatralla: 6 junaa/vrk
 - tavarajunat Luumäeltä: 24 junaa/vrk
 - tavarajunat Imatralla 23 junaa/vrk
- junien keskinopeus rataosalla (tavarajunille 64 km/h ja henkilöjunille 93 km/h)
- junatyyppeiden keskimääräiset pysähdysten lukumäärät ja niiden kestot
 - henkilöjunat Luumäeltä ja Imatralla: 2 pysähdystä kestoaltaan keskimäärin 2 min/pysähdys
 - tavarajunat Luumäeltä: 2 pysähdystä kestoaltaan keskimäärin 8 min/pysähdys
 - tavarajunat Imatralla: 2 pysähdystä kestoaltaan keskimäärin 5 min/pysähdys
- minimiaika, jonka asetinlaite sekä kauko-ohjaus- ja opastinjärjestelmät tarvitsevat ennen kuin seuraava juna voi lähteä liikkeelle edellisen junan poistuttua kriittiseltä väliltä:
 - henkilöjunille 1,0 min
 - tavarajunille 1,0 min
- pelivaran suuruus kriittisellä välillä kullekin junatyypille:
 - henkilöjunat: 1,5 min
 - tavarajunat 2,5 min

Edellä esitettyjen junatyypikohtaisten lähtötietojen lisäksi CAPACITY-malliin on syötettävä myös joitain yleisiä lähtöarvoja. Suurimman sallitun kapasiteetin käyttöasteen arvoksi on määritetty 80 prosenttia. Lisäksi mallin korjauskertoimille dm ja dt on annettu arvoksi 1, koska menetelmän käytöstä ei ole aiempaa kokemusta. Järjestelmien operointiaikojen lisäksi minimiaikoihin di on kuitenkin lisätty ajonopeudesta riippuva korjaustekijä. Korjaustermi saa arvokseen opastinvälin läpiajamiseen kuluvan ajan sellaisissa tapauksissa, joissa kaksi perättäistä junaa ajaa samaan suuntaan. Jos taas peräkkäiset junat ajavat vastakkaisiin suuntiin, saa korjaustermi arvokseen kriittisen kohtauspaikkavälin ajoajan.

Edellä esitetyillä lähtöarvoilla saadaan rataosan Luumäki–Imatra käytännön kapasiteetiksi 115 junaa/vrk. Tulos on todella suuri verrattuna muilla menetelmillä saatuihin lukuihin ja lähes kaksinkertainen nykyiseen junamäärään verrattuna.

Vaikka menetelmä ei ole tarkoitettu teoreettisen maksimikapasiteetin laskeamiseen, voidaan se kuitenkin vertailun vuoksi laskea antamalla lähtötiedoissa kapasiteetin käyttöasteeksi 100 %. Näin ollen rataosan teoreettiseksi maksimikapasiteetiksi saataisiin CAPACITY-mallin mukaan 144 junaa/vrk.

6.4.3 Kapasiteetin käyttöasteen laskenta UIC 406 -menetelmällä

Tässä kappaleessa esitetyt kapasiteetin käyttöasteen tulokset rataosalle Luumäki–Imatra on laskettu kappaleessa 4.3 esitellyn UIC 406 -menetelmän mukaisesti. Kapasiteetin käyttöaste määriteltiin voimassa olevien graafisten aikataulujen perusteella rataosan vilkkaimmalle kahden tunnin ajanjaksolle.

Laskennassa minimiajoaikaan lisättävän pelivaran suuruudeksi on arvioitu 10 prosenttia junien ajoajasta. Lisäksi junakohtausten on oletettu aiheuttavan keskimäärin 2 minuutin viiveen jokaiselle tarkasteluajankohtana liikennöivälle junalle. Menetelmässä käytetyt lähtöarvot on esitetty taulukossa 10. Lähtöarvojen lisäksi taulukosta käy ilmi laskennan tulokset tilanteille, joissa kunnossapidon tarvitsemaksi ajaksi on arvioitu 0, 5 ja 10 minuuttia.

Taulukko 10. UIC 406 -menetelmän laskemissa käytetyt lähtöarvot, sekä kapasiteetin käyttöasteet tilanteissa, joissa kunnossapitoaika on 0, 5 ja 10 minuuttia

Kriittinen rataosa	Vuorokauden vilkkain kaksituntinen	Junien lukumäärä	Junien kokonaisajoaika (min)	Pelivara (=10% ajoajasta)	Junakohtausta aiheutuva aikalisä (2min/juna)	Kapasiteetin käyttöaste, kun kunnossapidolle varataan		
						0 min	5 min	10 min
Joutseno-Rauha	19:00-21:00	7	75	7,5	14	80,4 %	84,6 %	88,8 %

Taulukosta 10 nähdään, että kunnossapitoajan pituudesta riippuen kapasiteetin käyttöaste huipputuntien aikana on Luumäki–Imatra rataosalla 80,4 ja 88,8 prosentin välillä. Banverketin (RHK 1999) määrittämien raja-arvojen mukaan voidaan todeta, että rataosan linjakapasiteetti on huipputuntien aikana lähes kokonaan käytössä, eikä rataosalle ole suositeltavaa lisätä vuoroja. Samojen raja-arvojen perusteella nykyinen liikenne aiheuttaa ongelmia ja häiriötilanteita toistuvasti.

Verrattaessa edellä esitettyjä tuloksia RHK:n vuonna 1999 teettämän tutkimuksen tuloksiin (RHK 1999) havaitaan, että kapasiteetin käyttöaste on rataosalla kasvanut. Banverketin menetelmällä vuonna 1999 tehdyssä tarkastelussa rataosan Luumäki–Lappeenranta huipputuntin kapasiteetin käyttöasteeksi saatiin 36 prosenttia ja rataosan Lappeenranta–Imatra 74 prosenttia. Koska koko rata-

osan kriittinen väli (Joutseno–Rauha) sijaitsee viimeksi mainitulla rataosalla, voidaan tulosten todeta olevan hyvin samansuuntaisia. Kapasiteetin käyttöasteessa tapahtunut kasvu selittyneekin suoraan rataosan kasvaneella tavarajunamäärällä eikä esimerkiksi menetelmien laskentavoista johtuvilla eroilla. Vuonna 1999 rataosalla liikennöi keskimääräisenä arkipäivänä 33 junaan vuorokaudessa, kun vuonna 2005 vastaava junamäärä on nousut 47 junaan vuorokaudessa.

6.5 Kapasiteettianalyysissä saatujen tulosten vertailu

6.5.1 Kapasiteettilaskentojen laskentatulosten vertailu

Taulukossa 11 on kootusti esitetty eri menetelmillä lasketut tarkasteltavien rataosien teoreettisen kapasiteetin arvot. Taulukossa 12 on vastaavien rataosien käytännön kapasiteetin arvot.

Taulukko 11. Teoreettisen kapasiteetin laskentatulokset rataosilla Seinäjoki–Oulu sekä Luumäki–Imatra

	Rataosa					
Laskentamenetelmä	Seinäjoki-Pännäinen	Pännäinen-Kokkola	Kokkola-Ylivieska	Ylivieska-Tuomioja	Tuomioja-Oulu	Luumäki-Imatra
Puolalainen	120	128	130	116	134	120
Italialinen	51	88	57	49	97	82
CAPACITY	101	163	114	91	135	144
Tulosten keskiarvo	91	126	100	85	122	115

Taulukko 12. Käytännön kapasiteetin laskentatulokset rataosilla Seinäjoki–Oulu sekä Luumäki–Imatra

	Rataosa					
Laskentamenetelmä	Seinäjoki-Pännäinen	Pännäinen-Kokkola	Kokkola-Ylivieska	Ylivieska-Tuomioja	Tuomioja-Oulu	Luumäki-Imatra
Puolalainen	96	102	104	93	107	96
Italialinen	41	70	45	40	77	66
CAPACITY	81	130	91	73	108	115
Tulosten keskiarvo	73	101	80	69	97	92

Taulukoista 11 ja 12 nähdään, että eri menetelmillä saadut kapasiteettitulokset vaihtelevat suuresti, eivätkä tulokset ole edes täysin samansuuntaisia. Esimerkik-

si Puolalaisen ja Italialaisen menetelmän mukaan suurin kapasiteetti rataosalla Seinäjoki–Oulu saadaan välillä Tuomioja–Oulu, kun taas CAPACITY-mallin mukaan rataosan maksimikapasiteetti sijaitsee välillä Pännäinen–Kokkola. Rataosan Seinäjoki–Oulu pienin kapasiteetin arvo saadaan kaikilla menetelmillä välillä Ylivieska–Tuomioja, mutta tulosten absoluuttinen arvo vaihtelee tälläkin välillä paljon.

Vaikka Puolalainen menetelmällä sisältää oletuksen siitä, että joka toinen juna liikennöi vastakkaiseen suuntaan, saadaan pienimmät kapasiteettitulokset Italialaisella menetelmällä. Koska kriittisten välien ajoajat ovat kaikilla ratasoilla suurin piirtein samansuuruisia, ovat myös puolalaisella menetelmällä tuloksina saadut kapasiteettien määrät hyvin lähellä toisiaan. Tarkastelluista menetelmistä puolalainen menetelmä onkin kaikkein johdonmukaisin, mutta sen tulokset ovat kauttaaltaan selvästi liian suuria.

Puolalaisen menetelmän tarkkuus riippuu täysin siitä miten hyvin ajoajat t_1 ja t_2 sekä viiveparametrit d_1 ja d_2 saadaan määritettyä. Tässä työssä saatujen tulosten perusteella viiveparametreille d_1 ja d_2 tulisi käyttää huomattavasti suurempia arvoja. Ajoaikojen t_1 ja t_2 arvot kannattaa puolestaan laskea aikataulunmukaisten tavarajunien ja henkilöjunien ajoaikojen painotettuina keskiarvoina, kuten tässä työssä on tehty. Verrattaessa puolalaisella menetelmällä saatuja taulukossa 12 esitettyjä käytännön kapasiteetin arvoja graafisten aikataulujen (liitteet 2 ja 4) perusteella määritettyihin rataosien nykyisiin junamääriin havaitaan, että rataosan Seinäjoki–Oulu tulokset ovat noin kaksinkertaisia nykyisiin junamääriin verrattuna. Tämän perusteella olisikin suositeltavaa jakaa puolalaisella menetelmällä saadut tulokset kahdella, jolloin käytännön kapasiteetin arvot olisivat erittäin lähellä nykyisiä liikennemääriä.

Puolalaisen menetelmän tavoin myös italialaisen menetelmän tulokset ovat pitkälti riippuvaisia siitä, miten kriittisen välin ajoajat määritellään henkilö- ja tavarajunille. Italialainen menetelmä oli tutkituista menetelmistä ainoa, jonka käytännön kapasiteetin tulokset olivat samaa suuruusluokkaa kuin vastaavien rataosien nykyiset junamäärät. Taulukoissa 11 ja 12 kuitenkin havaitaan, että italialaisella menetelmällä saaduissa tuloksissa on paljon vaihtelua. Vaihtelu selittyy mallissa esiintyvällä keskimääräisellä ajoaikoihin lisättävällä viiveellä, jonka arvo on yhteinen tavarajunien ja henkilöjunien välillä. Tässä työssä keskimääräinen viive määritettiin graafisesta aikataulusta laskemalla yhteen kaikki tarkasteltavan rataosan viiveet ja jakamalla summa junien kokonaislukumäärällä. Näin määriteltynä henkilöjunien viiveet muodostuvat liian suureksi, mikä pienentää tulokseksi saatua kapasiteetin määrää etenkin rataosilla Seinäjoki–Pännäinen, Kokkola–Ylivieska ja Ylivieska–Tuomioja. Menetelmää tulisikin kehittää vähintään siten, että kes-

kimääräisen pysähdyksestä aiheutuvan viiveen kesto määritellään erikseen sekä henkilö- että tavarajunille.

CAPACITY-mallilla saadaan järjestelmällisesti keskiarvoa suurempia tuloksia. Mallin suurin ongelma on se, ettei se huomioi kiihdyttämisen ja jarruttamisen vaikutuksia ajoaikoihin. Tästä johtuen junien ajo- ja varausajat jäävät liian pieniksi ja tulokseksi saadaan liian suuria kapasiteetin arvoja.

Taulukoista 11 ja 12 nähdään, että CAPACITY-mallilla saadut tulokset vaihtelevat tarkastelluista menetelmistä eniten. Suurimat kapasiteetin arvot saadaan lyhyimmillä rataosilla Pännäinen–Kokkola, Luumäki–Imatra ja Ylivieska–Tuomioja. Tämä selittyy CAPACITY-mallin toisella virheellisellä oletuksella. Vaikka malli ottaakin huomioon erilaisten junakombinaatioiden vaikutuksen kapasiteetin määrään, se käsittelee väärin sellaiset tilanteet, joissa hidas juna seuraa nopeaa junaa. Menetelmä laskee oikein sen, että tällainen yhdistelmä varaa kapasiteettia enemmän kuin kaksi samalla nopeudella ajavaa junaa, mutta CAPACITY-malli ei ota huomioon sellaista mahdollisuutta, että perässä tuleva hitaan junan voi ohittaa yksi tai useampia nopeita junia. Tästä johtuen tarkasteltaessa pitkiä rataosia nopeampien junien perässä ajavat hitaat junat vaikuttavat kapasiteetin määrään pienentäen sitä selvästi. Tämän työn yhteydessä tehtyjen raportoitamattomien laskutoimitusten perusteella CAPACITY-mallilla ei tulisi laskea yli 150 kilometriä pitkien rataosien kapasiteettia ilman, että malliin tehdään muokkauksia, jotka parantavat ohitustilanteiden huomioonottamista.

Tapaustutkimuksissa puolalainen menetelmä oli ainoa, joka antoi johdonmukaisesti samansuuruisia tuloksia. Puolalaisen menetelmän antamat tulokset olivat kuitenkin noin kaksinkertaa suurempia mitä käytännössä on havaittu. Johdonmukaisuuden ja yksinkertaisuutensa vuoksi puolalainen menetelmä voisi soveltua kuitenkin esimerkiksi eri rataosien tai toimenpidevaihtoehtojen karkeaan vertailuun.

Italialainen menetelmä oli puolestaan ainoa, jonka tulokset olivat järjestelmällisesti suurin piirtein oikeaa suuruusluokkaa. Menetelmällä saadut rataosakohtaiset tulokset vaihtelevat kuitenkin paljon, eikä menetelmän käyttöä voida suositella ilman, että siinä esiintyvän viiveparametrin i määrittämisperiaatteita tarkennetaan.

CAPACITY-malli on nyt saaduista tuloksista huolimatta lupaavaa menetelmä, ja lisätarkastelulla avulla sen parametrien arvoja on todennäköisesti mahdollista saada paremmin Suomen rataverkkoon soveltuviksi. CAPACITY-mallin etu on kyky käsitellä niin yksi kuin useampiraiteisia rataosia ja mahdollisuus syöttää malliin useita eri junatyyppejä yksilöllisine lähtötietoineen. Menetelmän tulokset tarkentuvat sitä myötä mitä tarkempia lähtötietoja malliin syötetään. Kasvava lähtötietojen määrää tekee itse laskennasta kuitenkin paljon raskaampaa. Mallin

käytettävyyttä voidaan parantaa merkittävästi, jos sen laskentakaavat rakennetaan esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmaan.

Koska eri menetelmillä saadut tulokset vaihtelevat paljon, on suositeltavaa, että rataosan kapasiteetti lasketaan kahdella tai useammalla menetelmällä kunnes jostain menetelmästä on kerätty riittävästi tietoa, jotta laskentamenetelmä voidaan kalibroida Suomen olosuhteita vastaavaksi ja sen tulokset on todettu johdonmukaisiksi.

6.5.2 Kapasiteetin käyttöasteen laskentatulosten tarkastelu

Työssä esiteltyt kapasiteetin käyttöasteen laskentamenetelmät eivät eroa laskentaperiaatteiltaan eivätkä tuloksiltaan toisistaan merkittävästi. Suurin ero esiteltyjen menetelmien välillä on se, että Suomessa vuonna 1999 sovellettu Banverketin menetelmä määrittelee eri kokonaisaikojen laskentamenetelmät tarkemmin kuin uudempi UIC 406 -menetelmä. Molemmat menetelmät tarvitsevat kuitenkin valmiin aikataulun lähtötiedokseen ja tarvittavien lähtötietojen kerääminen manuaalisesti graafisesta aikataulusta on hidas toimenpide. Monessa Euroopan maassa UIC 406 -menetelmä onkin sisällytetty käytössä olevaan tietokoneavusteiseen aikataulutushjelmaan.

Kapasiteetin käyttöasteen laskentamenetelmillä saadaan tarkempia ja luotettavampia tuloksia kuin kapasiteetin laskentamenetelmillä, mutta ne perustuvat aina olemassa olevaan aikatauluun, eikä niiden avulla voida ennustaa esimerkiksi kohtauspaikan lisäämisestä aiheutuvaa kapasiteetin lisääntymistä ilman, että uudelle tilanteelle laaditaan aikataulu. Tästä johtuen UIC 406 -menetelmä soveltuu parhaiten kahden tai useamman aikataulurakenteen vertailuun sekä rataverkon pullonkaulojen paikallistamiseen. Otollisimpia ajankohtia UIC 406 -menetelmän käyttöön ovat uuden aikataulurakenteen suunnitteluvaiheet, jolloin olemassa olevan ja suunnitteella olevien aikataulurakenteiden vaikutuksia jäljelle jäävän kapasiteetin määrään voidaan menetelmän avulla verrata.

Infrastruktuurin haltijan on mahdollista käyttää UIC 406 -menetelmää kapasiteetin jakamisprosessissa aputyökaluna sekä paikallistamaan nykyisen aikataulurakenteen ongelmakohtia rataverkolta. Ratakapasiteetin jakamisen työkaluksi menetelmä soveltuu etenkin, jos kapasiteetin käyttöasteen laskentaprosessi on sisällytetty aikataulutushjelmaan. Tällöin kapasiteetin jakaja voi nopeasti tarkistaa mahdollisten lisäjunien vaikutuksen kapasiteetin käyttöasteeseen ja liikenteen täsmällisyyden heikentymiseen. Jotta menetelmä soveltuisi edellä kuvattuun tehtävään, on kullekin rataosalle ensin määriteltävä raja-arvot liikennöinnin eri palvelutasoille. Palvelutasojen raja-arvot voitaisiin määrittellä esimerkiksi odotettavissa olevien myöhästymistapausten perusteella.

6.6 Myöhästymistilastojen analysointi

6.6.1 Yleistä tarkastelusta

Kapasiteetin ja kapasiteetin käyttöasteen laskentojen lisäksi tässä työssä on tehty junan kulun seurantajärjestelmä JUSEen kirjattujen myöhästymisiä perusteella analyysi koko Suomen rataverkolla tapahtuneista myöhästymistapauksista. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää JUSEsta saatavien tietojen käyttömahdollisuus kapasiteettianalyyseissa.

JUSE otettiin käyttöön 18.10.2004 ja lyhyen testijakson jälkeen luotettavaa tietoa siitä on saatu vuoden 2005 alusta alkaen. Tällöin JUSE korvasi lopullisesti VR Osakeyhtiöllä käytössä olleen erillisen junien täsmällisyysseurantajärjestelmän, jonka suurin ongelma oli tietojen syöttämisen hitaus. Myöhästymistiedot syötettiin ennen manuaalisesti ja tiedot päivittyivät järjestelmään 1–2 päivän viiveellä. (Raaska 2004 & Blomqvist 2005.)

JUSEn käyttöönoton myötä myöhästymistilastojen tarkkuustasoa on saatu parannettua merkittävästi. Nyt juna merkitään myöhästyneeksi, jos lähiliikennejuna saapuu yli 3 minuuttia ja kaukoliikennejuna yli 5 minuuttia myöhästyneenä määräasemalle. JUSEa edeltäneessä järjestelmässä osa junista kirjattiin myöhästyneeksi vasta, jos ne saapuivat 15 minuuttia myöhästyneinä määräasemalle. Myöhästyminen voidaan tilanteesta riippuen kirjata joko liikennepaikalle tai kahden liikennepaikan väliselle rataosalle. (Blomqvist 2005.)

Kun juna myöhästyy seuranta-asemalle saapumisajastaan vähintään mainitun raja-arvon, 3 min lähiliikenteessä ja 5 min kaukoliikenteessä, seurataan junan kulkua entistä tarkemmin ja muutokset aikataulutetun ja toteutuneen saapumisaikojen erotuksessa kirjataan ± 1 minuutin tarkkuudella. Junan saavuttaessa aikatauluaan tai myöhästyessä siitä lisää vähintään minuutin kirjataan muutos JUSEen. Näin ollen myöhästyneen junan kulkua on mahdollista seurata jälkeensä koko reitin varrelta. Seurantatietoa voidaan käyttää jälkeensä hyväksi esimerkiksi aikataulusuunnittelussa. (Blomqvist 2005.)

Toisin kuin aiemmat järjestelmät JUSE kirjaa myöhästymiset automaattisesti. Liikenteenohjaajien tulee kuitenkin syöttää kullekin myöhästymistapaukselle syykoodi. JUSEn syykoodit ovat jaettu 13 pääluokkaan ja edelleen useampaan alaluokkaan. Mahdollisista kapasiteettiongelmien indikaattorina toimivat L-luokan syykoodit, jotka selittävät liikenteellisistä syistä aiheutuneita myöhästymisiä. Kaikki JUSEssa käytetyt syykoodit ja niiden selitykset löytyvät tämän työn liitteestä 1. (Blomqvist 2005.)

6.6.2 Myöhästymistilastojen analysoinnissa käytetyt lähtötiedot

Myöhästymistilastojen analysoinnissa käytetyt rataosien ja liikennepaikkojen väliset etäisyydet perustuvat Ratahallintokeskuksen julkaisuun ”Luettelo rautatie-liikennepaikoista 1.6.2003” (RHK 2003a). Liikennemäärätiedot perustuvat puolestaan vuoden 2003 arkipäivien keskimääräisiin junamääriin (VR 2003). Analyysissa käytettiin vanhentuneita liikennemäärätietoja, koska Suomen rataverkon keskimääräisiä liikennemääriä ei ole kootusti raportoitu vuoden 2003 jälkeen. Vuoden 2003 ja 2005 liikennemäärät ovat hyvin samankaltaisia, mutta etenkin tavaraliikenteen junamäärät ovat usealla rataosalla hiukan muuttuneet (Pussinen 2005). Tällaiset erot liikennemäärissä saattavat jonkin verran vääristää regressiomalleja ja niiden selityksasteita.

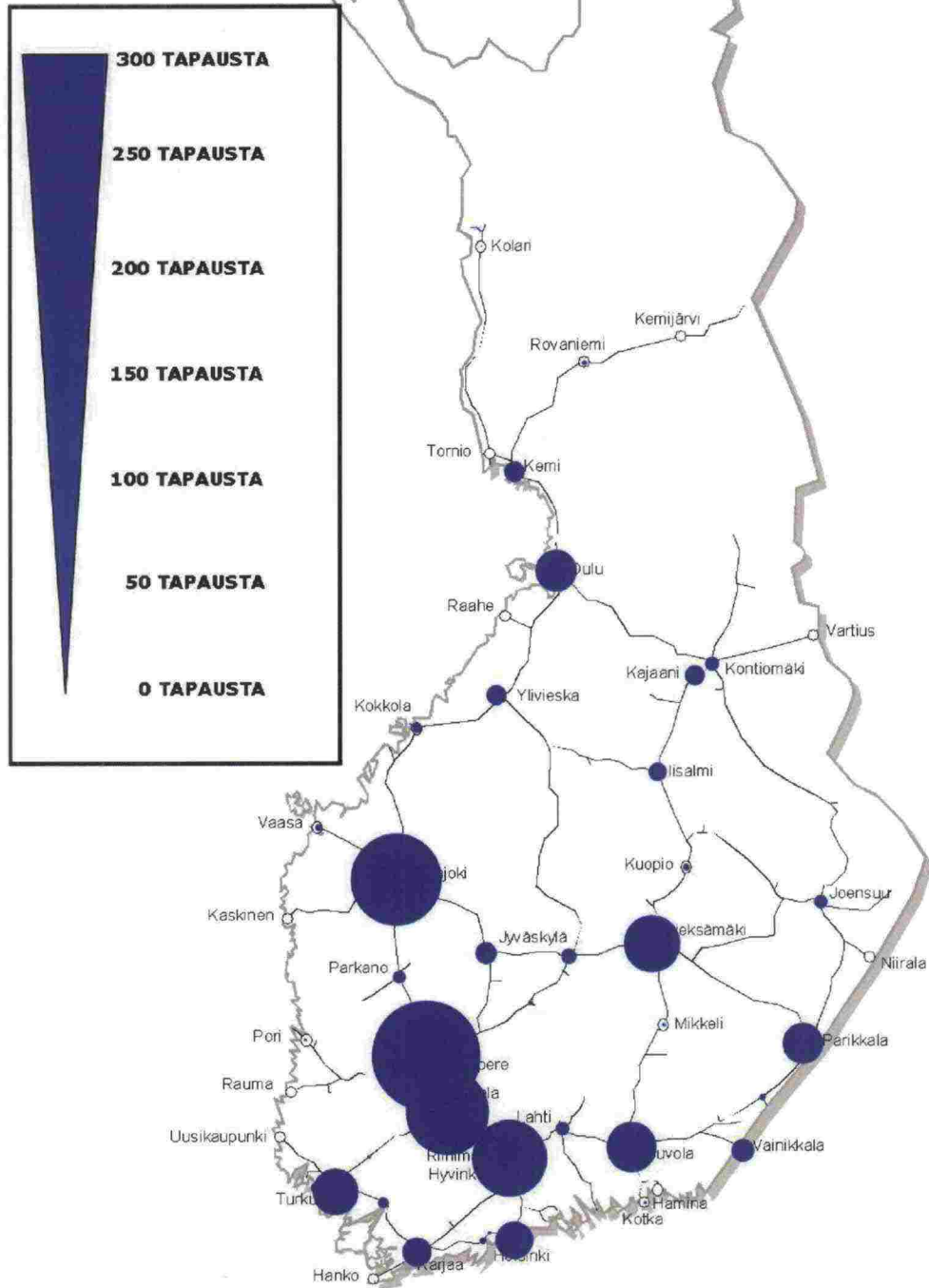
Myöhästymistilastojen analysoinneissa lähtöaineistona käytetyt myöhästymistapaukset perustuvat vuoden 2005 osalta JUSEen kirjattuihin myöhästymistapauksiin. Aikaisempien vuosien tiedot perustuvat JUSEa edeltäneen junien täsmällisyysseurantajärjestelmän tietoihin.

Koko rataverkolle tehdyissä myöhästymistilastojen analysoinnissa lähtötietona on käytetty tammi–maaliskuussa 2005 kaukoliikenteen henkilöjunien L-syykoodeille JUSEen kirjatut myöhästymistapaukset. Tavaraliikenteen junien myöhästymisiä ei otettu mukaan tutkimukseen poikkeavan liikennöintitavan takia. Tavarajunat lähetetään usein tarkoituksellisesti liikkeelle ennen niiden varsinaista aikataulunmukaista lähtöaikaa, jolloin ne myös usein saapuvat ennen aikataulunmukaista aikaa määräasemalle (Blomqvist 2005). Tällaiset tilanteet kirjataan JUSEen etuajassa saapuneiksi ja niiden arveltiin vääristävän analyysiä. Tästä syystä tarkastelut päätettiin tehdä ainoastaan kaukoliikenteen henkilöjunille kirjatuille myöhästymistapauksille.

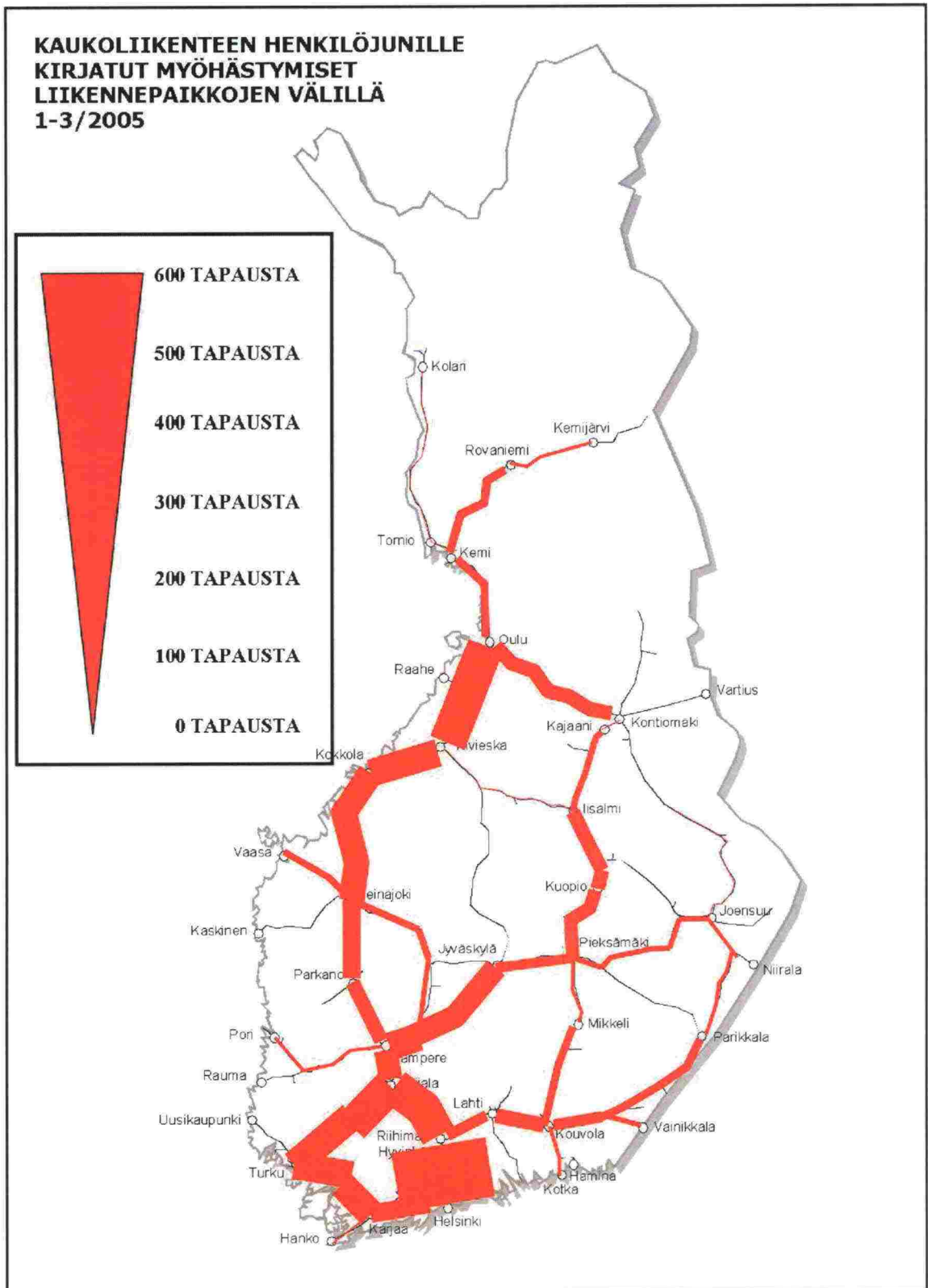
Toinen syy tavaraliikenteen tietojen poisjättämiseen oli se, ettei ennen JUSEn käyttöönottoa ja vuoden 2005 alkua ole saatavilla vertailukelpoista tarkasteluaineistoa aikaisemmilta vuosilta (Blomqvist 2005). Aikaisimpien vuosien myöhästymistilastojen avulla haluttiin nimittäin verrata myöhästymistapausten kehittymistä ja arvioida onko tarkasteltavien rataosien Seinäjoki–Oulu ja Luumäki–Imatra kapasiteetissa tapahtunut muutoksia.

Kuvassa 39 on esitetty liikennepaikoille ja kuvassa 40 liikennepaikkojen väleille kirjatut kaukoliikenteen henkilöjunille liikenteellisistä syistä tapahtuneet myöhästymistapaukset 1.1.–31.3.2005 välisenä aikana. Koska liikennepaikalle kirjattua myöhästymistä ei voida kohdentaa tietylle rataosalle, on regressioanalyysin lähtötietona käytetty ainoastaan kuvan 40 liikennepaikkojen väleille kirjattuja myöhästymisiä.

**KAUKOLIIKENTEEN HENKILÖJUNILLE
KIRJATUT MYÖHÄSTYMISET
LIIKENNEPAIKOILLA 1-3/2005**



Kuva 39. Liikennepaikoille kirjatut myöhästymiset tammi–maaliskuussa 2005



Kuva 40. Myöhästymiset liikennepaikkojen välillä tammi–maaliskuussa 2005.

Kuvasta 39 nähdään, että liikennepaikoista eniten myöhästymistapauksia kirjattiin Tampereelle (379 kpl), Seinäjoelle (317 kpl), Toijalaan (289 kpl) ja Riihimäelle (261 kpl). Tulos on sinällään looginen, että kaikki asemat ovat pääradan varressa sijaitsevia vilkkaita henkilökaukoliikenteen liikennepaikkoja.

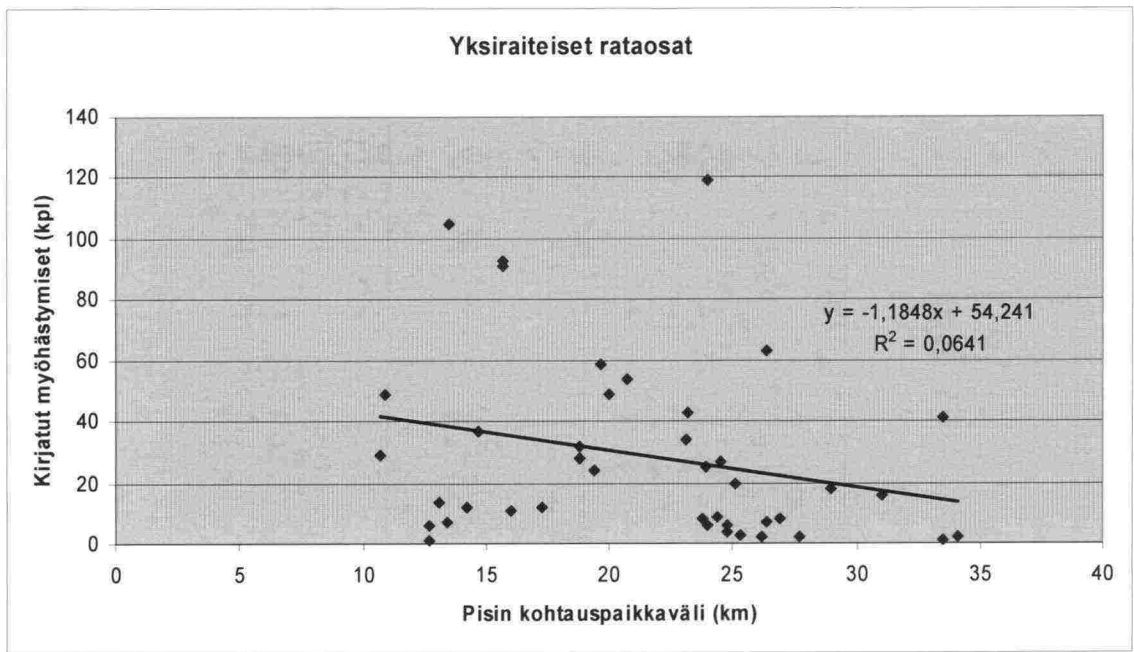
Vastaavasti kuvan 40 perusteella voidaan havaita, että eniten liikennepaikkojen väleille myöhästymisiä on kirjattu pääradalle sekä Helsingin ja Turun sekä Turun ja Toijalan välisille rataosille. Selvästi eniten myöhästymisiä kaukoliikenteen henkilöjunille on tarkasteltavana ajanjakson aikana kirjattu välille Helsinki–Hyvinkää.

Koska yksiraiteiset rataosat poikkeavat liikennöintiominaisuuksiltaan merkittävästi kaksi- ja useampiraiteisista rataosista, päätettiin tarkasteltava aineisto jakaa kahteen osaan. Kappaleessa 6.6.2 on esitelty yksiraiteisen rataosien ja kappaleessa 6.6.3 kaksi- ja useampiraiteisten tutkimustulokset. Suurin osa Suomen rataverkosta on yksiraiteista. Kaksi- tai useampiraiteisia ovat ainoastaan seuraavat rataosat (RHK 2005b):

1. Helsinki–Lielähti
2. Helsinki–Kirkkonummi
3. Huopalahti–Vantaankoski
4. Riihimäki–Luumäki
5. Kouvola–Juurikorpi
6. Tampere–Orivesi
7. Pohjois-Louko–Etelä-Seinäjoki

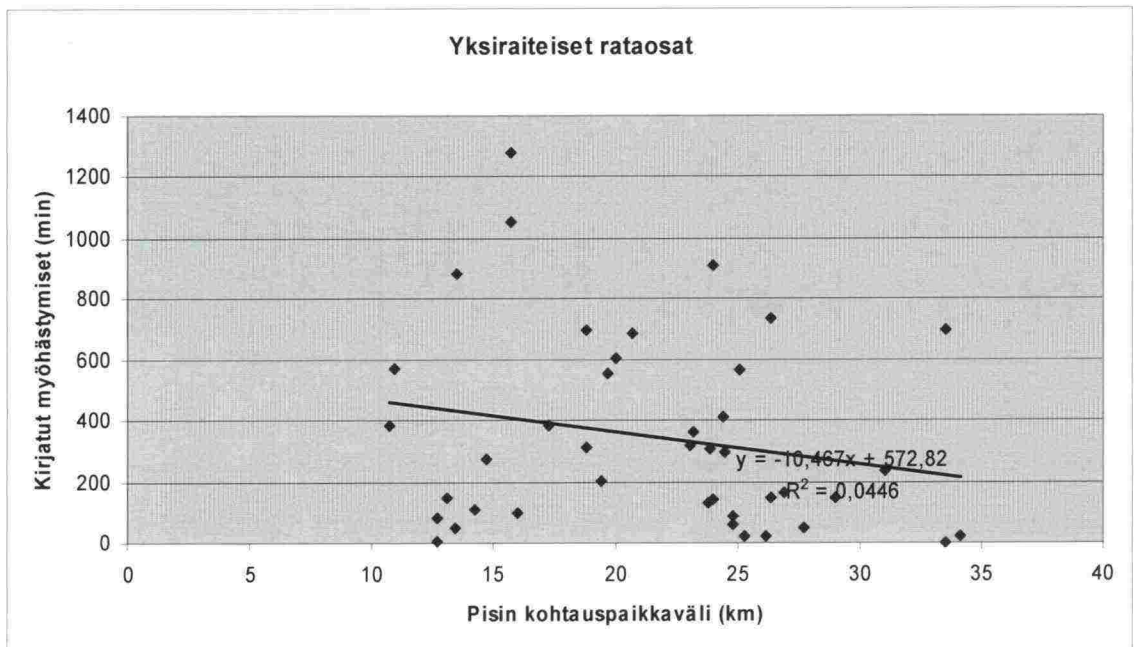
6.6.3 Yksiraiteisten rataosien regressioanalyysit

Kuvassa 41 on esitetty yksiraiteisella rataverkolla JUSEen kirjatut myöhästymistapaukset 1.1.–31.3.2005 välisellä ajalla sekä niitä vastaavien rataosien pisimpien kohtauspaikkavälien pituudet. Lisäksi kuvassa on esitetty pienimmän neliösumman mukainen regressiosuora sekä sen selitysaste.



Kuva 41. Kirjattujen myöhästymistapausten ja vastaavien rataosien pisimpien kohtaauspaikkavälien lineaarinen korrelaatio Suomen yksiraiteisilla rataosilla.

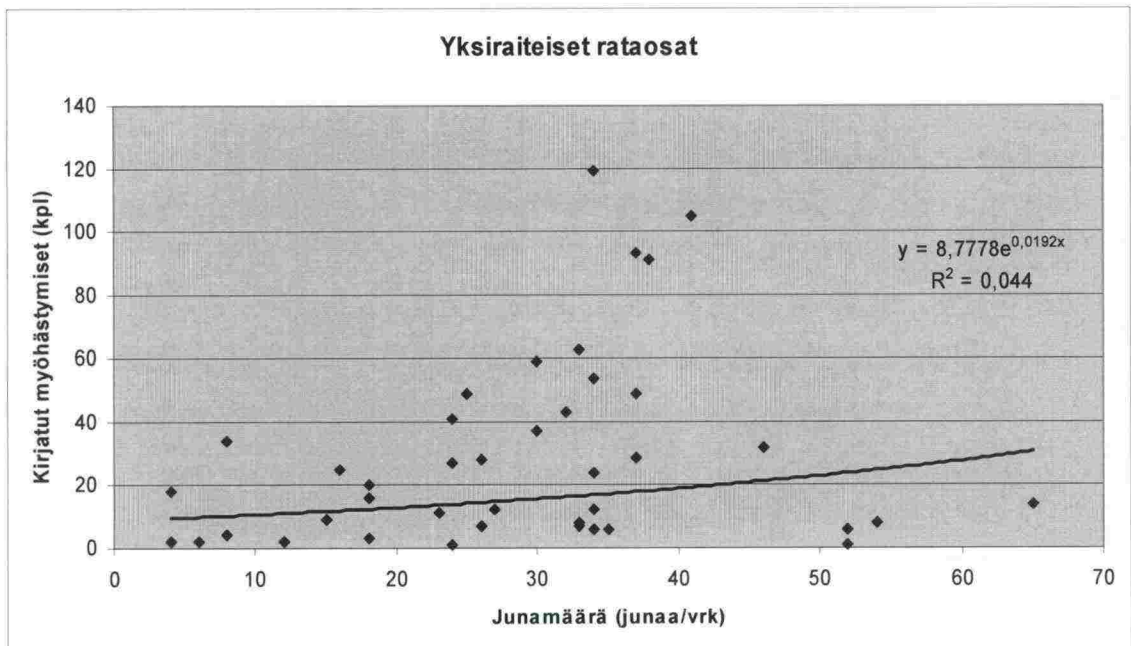
Kuvassa 42 on esitetty kuvan 41 kanssa muuten yhtenevät tiedot, mutta y-akselilla on esitetty myöhästymistapausten lukumäärän sijaan myöhästymistapauksille kirjattujen viiveiden yhteiskesto minuuteissa.



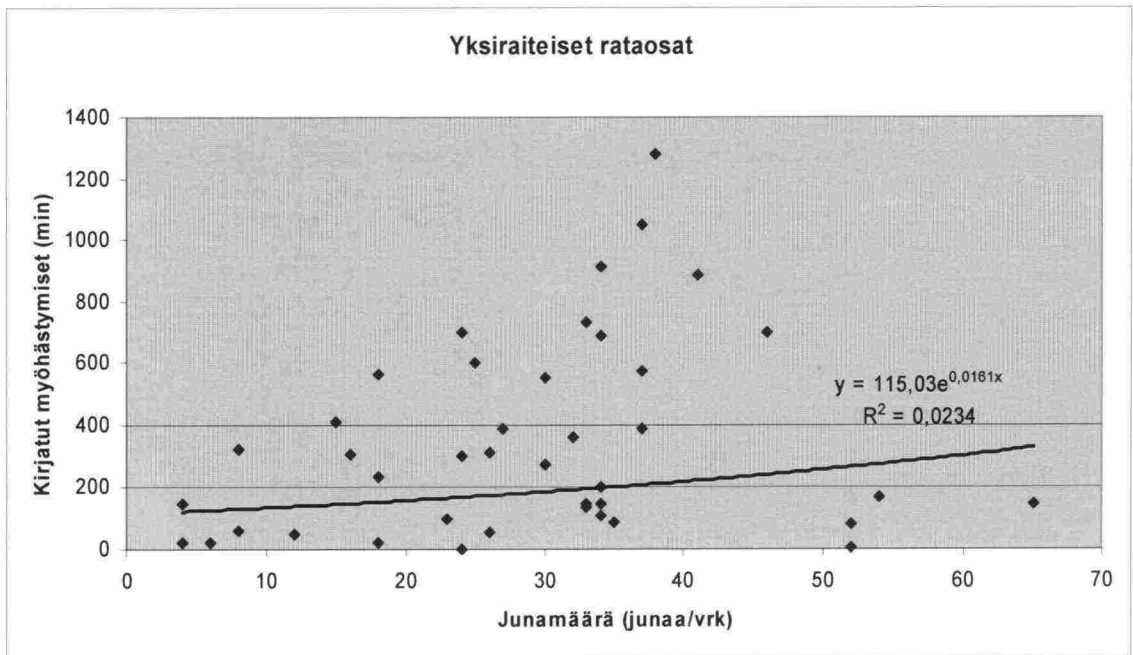
Kuva 42. Kirjattujen kokonaismyöhästymisaikojen ja vastaavien rataosien pisimpien kohtaauspaikkavälien lineaarinen korrelaatio Suomen yksiraiteisilla rataosilla

Kuvien 41 ja 42 perusteella voidaan havaita, että havaintopisteet ovat hajaantuneet, jolloin regressiosuorien selitysasteet jäävät hyvin pieniksi (0,064 ja 0,045). Siten kirjatut myöhästymistapaukset eivätkä niiden kokonaiskestot korreloi vastaavien rataosien pisimpien kohtaustaikkavälien kanssa.

Kappaleessa 4.12 esitellyn teorioiden mukaan rataosalla tapahtuvien myöhästymisten lukumäärän tulisi korreloida eksponentiaalisesti vastaavien junamäärien kanssa. Kuvassa 43 on esitetty 1.1.2005–31.3.2005 välisenä aikana kirjatut myöhästymistapaukset ja vastaavien rataosien junamäärät. Kuvassa 44 on esitetty muuten samat tiedot, mutta y-akselilla on esitetty myöhästymistapausten lukumäärän sijaan niistä aiheutuneiden viiveiden kokonaiskestot. Lisäksi molempiin kuviin on sovitettu parhaiten aineistoon sopivat eksponentiaaliset käyrät.

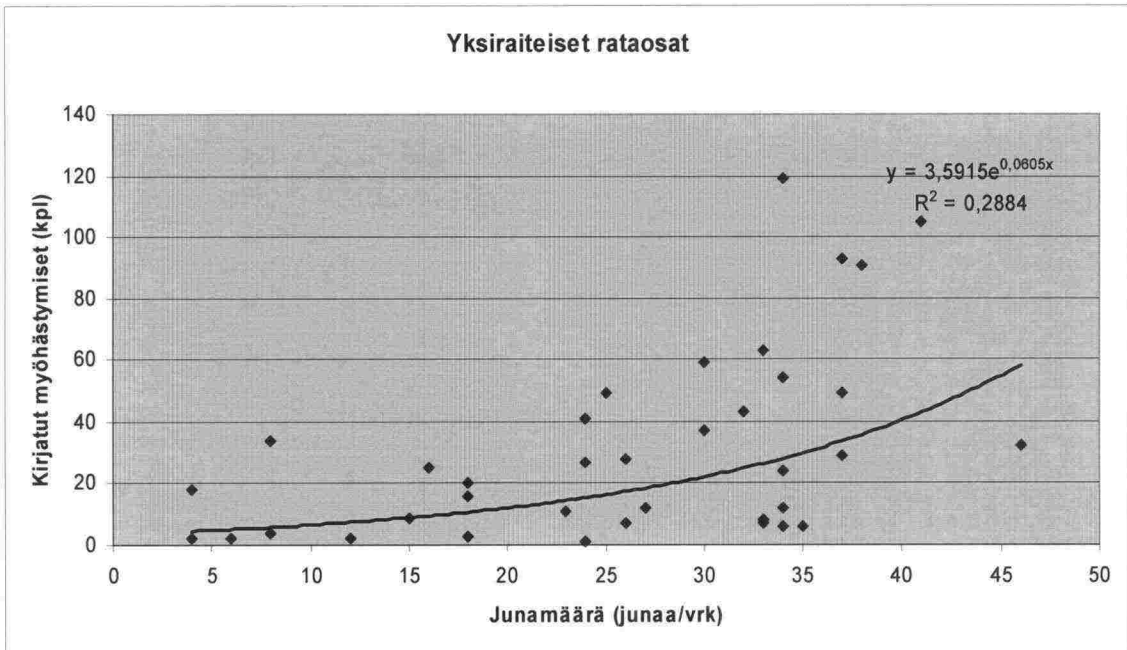


Kuva 43. Kirjattujen myöhästymistapausten ja vastaavien junamäärien välinen eksponentiaalinen korrelaatio Suomen yksiraiteisilla rataosilla.



Kuva 44. Kirjattujen kokonaismyöhästymisaikojen ja vastaavien junamäärien välinen eksponentiaalinen korrelaatio Suomen yksiraiteisilla rataosilla.

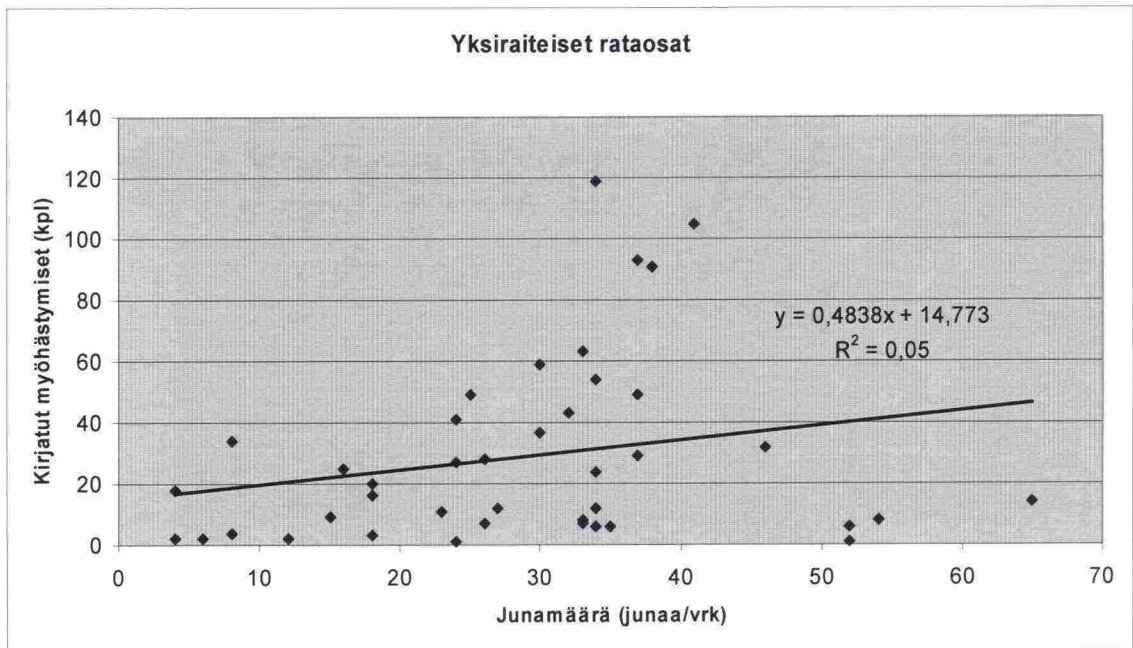
Kuvista 43 ja 44 havaitaan, että regressiokäyrien selitysasteet jäävät edelleen hyvin pieneksi. Kuvia tarkastelemalla voidaan todeta, että oikeassa alalaidassa olevat havainnot poikkeavat muista havainnosta. Kaikki neljä havaintoa ovat peräisin Kaakkois-Suomen rataosilta, joissa henkilöliikennejunien osuus kokonaisliikenteestä on suhteellisen pieni, kun taas tavarajunia rataosalla liikennöi todella paljon. Tarkasteltavassa aineistossa ovat mukana ainoastaan kuvassa 40 esitetyt henkilöliikenteelle kirjatut myöhästymiset, joten on perusteltua olettaa, että nämä neljä oikeassa alakulmassa olevaa havaintoa vääristävät mallia. Jos nämä havainnot poistetaan tarkasteluaineistosta, paranee havaintojen välinen korrelaatio merkittävästi. Kuvassa 45 on esitetty myöhästymistapausten ja junamäärien välinen eksponentiaalinen korrelaatio karsitulla aineistolla.



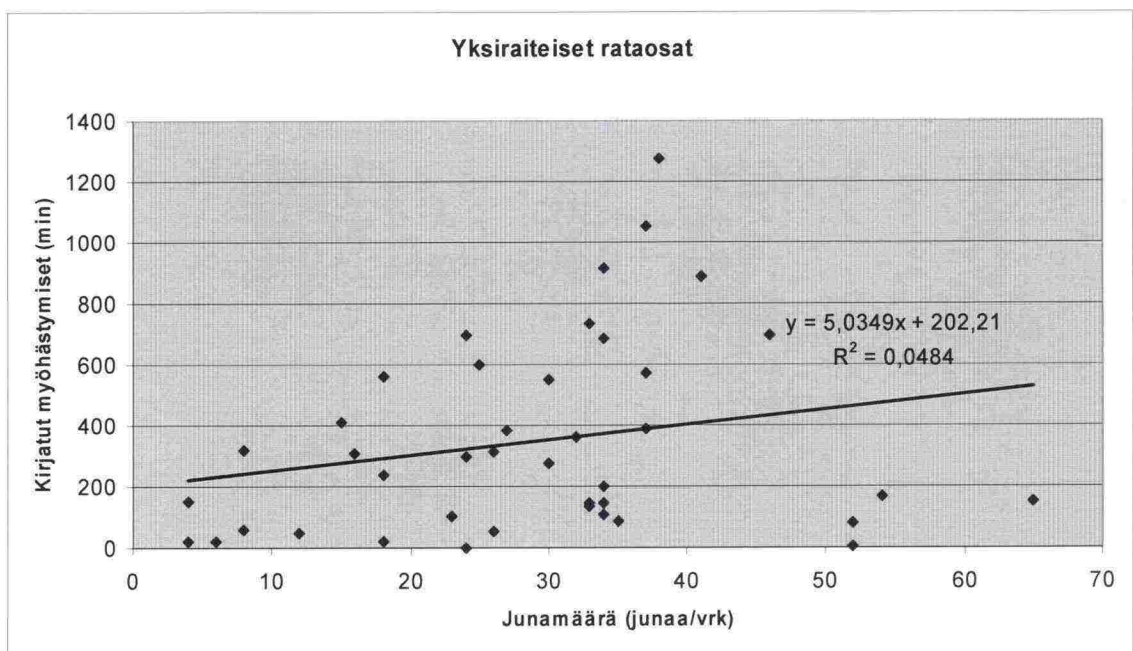
Kuva 45. Kirjattujen myöhästymistapausten ja vastaavien junamäärien välinen eksponentiaalinen korrelaatio karsitulla aineistolla.

Regressiokäyrän selitysaste parani poistamalla neljä Kaakkois-Suomen havaintoa, ja selitysasteeksi saatiin 0,29. Junamäärien ja myöhästymistapausten välillä näyttäisi olevan lievää korrelaatiota.

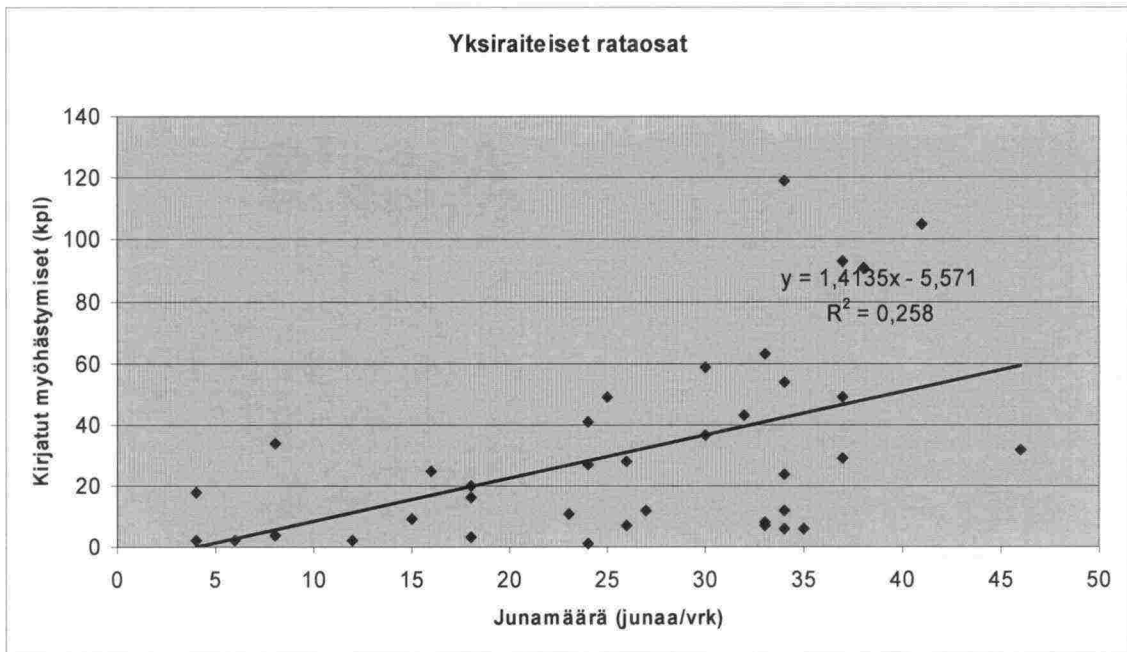
Varmuudeksi tutkittiin myös kuvissa 43–45 esitettyjen havaintopisteiden välinen lineaarinen korrelaatio. Kuvassa 46 on esitetty myöhästymistapausten ja junamäärien lineaarinen regressiosuora sekä kuvassa 47 kokonaisviiveiden ja junamäärien lineaarinen korrelaatio. Lisäksi koska eksponentiaalisen käyrän selitysaste kasvoi merkittävästi poistamalla mainitut neljä havaintoa, on vastaavalle karsitulle havaintojoukolle esitetty lineaarinen regressiosuora kuvassa 48.



Kuva 46. Myöhästymistapausten ja vastaavien junamäärien välinen lineaarinen korrelaatio Suomen yksiraiteisilla rataosilla



Kuva 47. Kirjattujen kokonaismyöhästymisaikojen ja vastaavien junamäärien välinen lineaarinen korrelaatio Suomen yksiraiteisilla rataosilla.



Kuva 48. Myöhästymistapausten ja vastaavien junamäärien välinen lineaarinen korrelaatio karsitulla aineistolla.

Kuvien 46–48 tulosten havaitaan olevan samansuuntaisia kuin eksponentiaalisen regressiokäyrän tapauksessa: koko aineistoa tarkastellessa selitysasteet jäävät todella pieniksi, mutta karsitulla aineistolla saadaan aikaan lievä korrelaatio myöhästymistapausten ja vastaavien junamäärien välille.

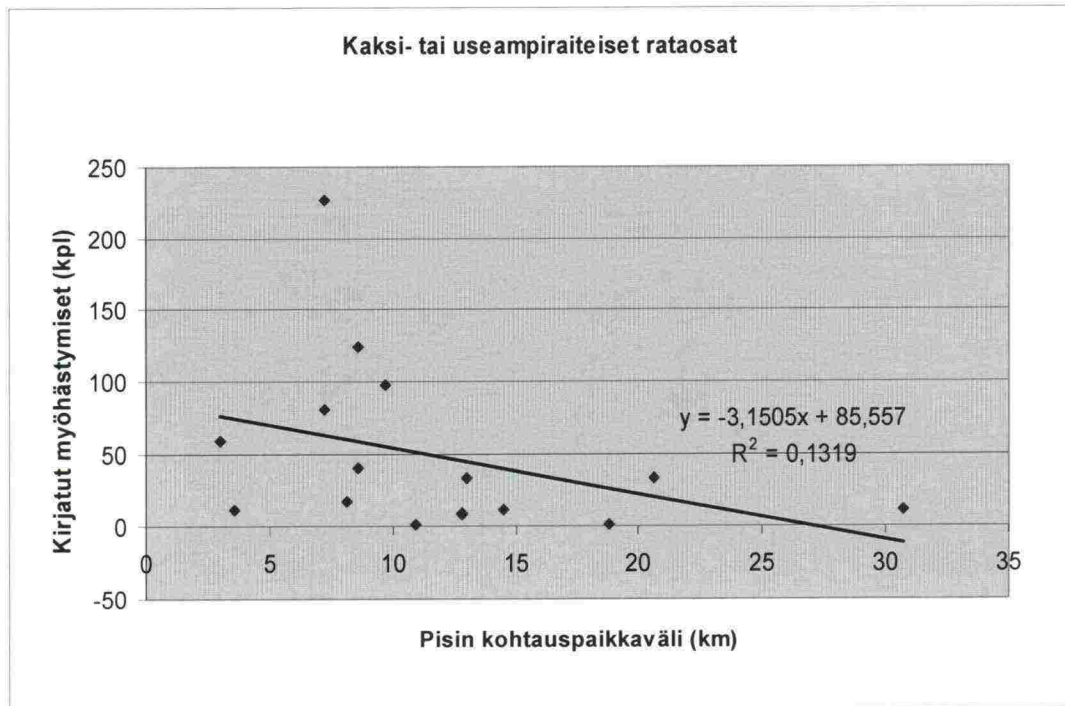
Yleisesti junamäärien ja myöhästymistapausten välillä on olemassa korrelaatio, mutta lähtötietojen tulisi olla kattavampia, jotta tämä voitaisiin tilastollisin menetelmin todistaa. Tutkimustulokset paranisivat todennäköisesti huomattavasti, jos mukana olisivat nyt lähtötietona olleiden kaukoliikenteen henkilöjunien lisäksi myös lähiliikenteen ja tavarajunien myöhästymistilastot. Toisaalta näiden tietojen lisääminen edellyttäisi, että myöhästymistiedot kirjattaisiin yhtenevien periaatteiden mukaisesti.

Eriävän myöhästymiskriteerin lisäksi tavaraliikenteen myöhästymistilastojen lisäämistä tarkasteluaineistoon hankaloittavat etuajassa lähtevät ja määräasemalleen saapuvat tavarajunat. Tällaisten tapausten lukumäärä on erittäin suuri koko Suomen rataverkolla.

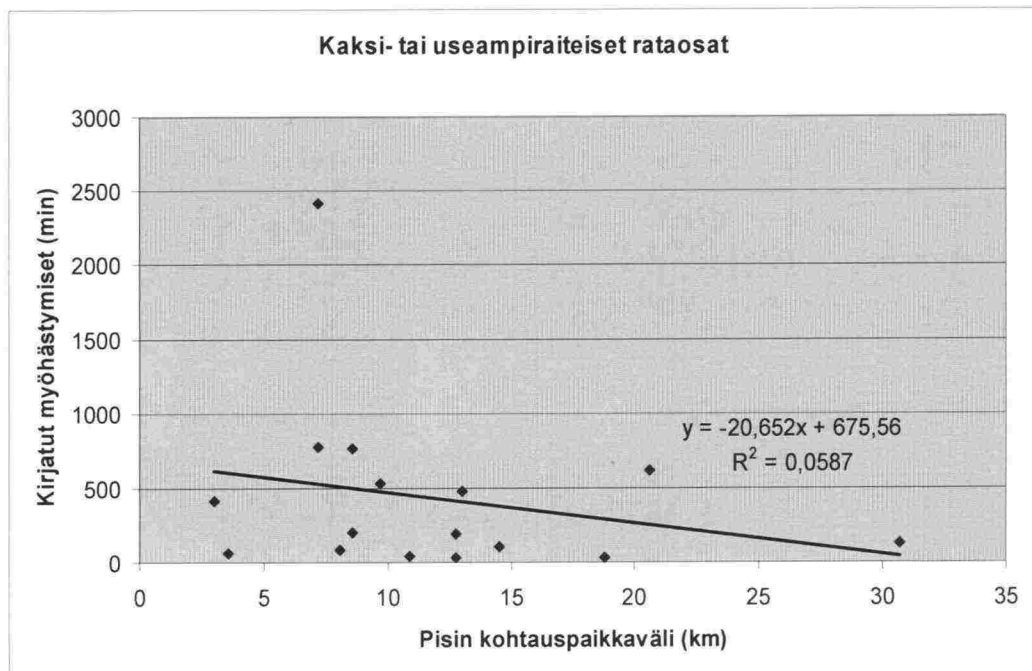
6.6.4 Kaksi- ja useampiraiteisten rataosien regressioanalyysit

Suomen kaksi- ja useampiraiteisille rataverkolle tehtiin vastaavat analyysit, kuin edellisessä kappaleessa kuvattiin yksiraiteisille rataosille. Kuvassa 49 on esitetty JUSEen kirjattujen myöhästymistapausten ja tapauksia kirjausvälejä vastaavien pisimpien kohtauspaikkavälien pituuksien välinen lineaarinen korrelaatio. Ku-

vassa 50 on samoja kohtauspaiikka etäisyyksiä verrattu myöhästymistapausista aiheutuneiden kokonaisviiveiden kestoon.



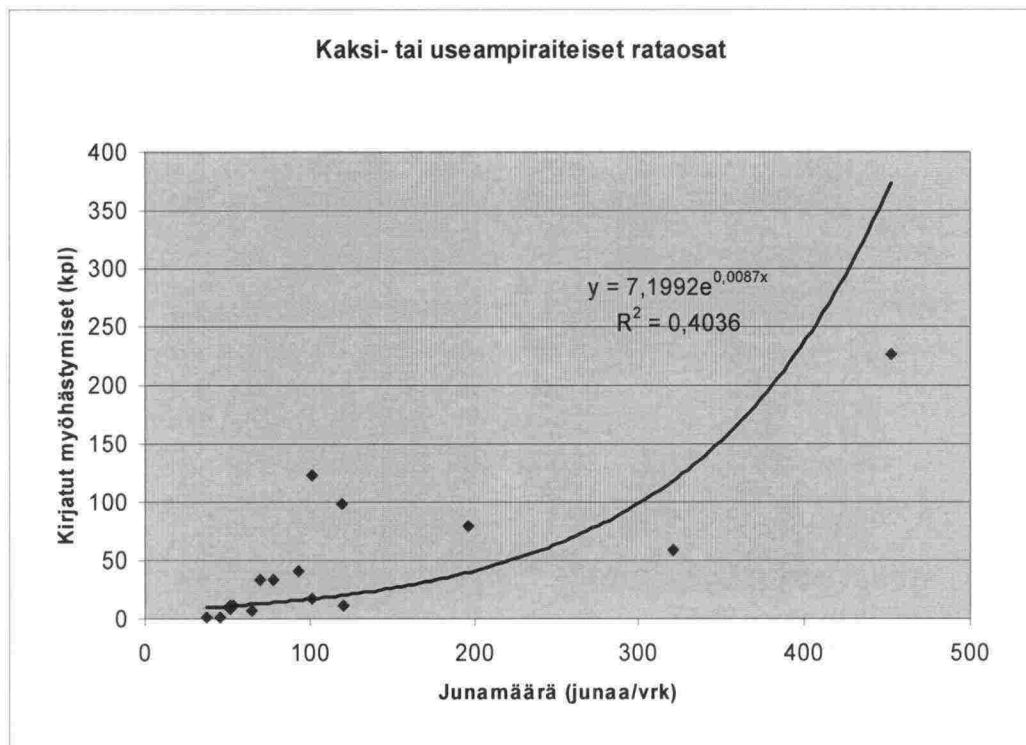
Kuva 49. Kirjattujen myöhästymistapausten ja vastaavien rataosien pisimpien kohtauspaiikkavälien välinen lineaarinen korrelaatio Suomen kaksi- ja useampiraiteisilla rataosilla.



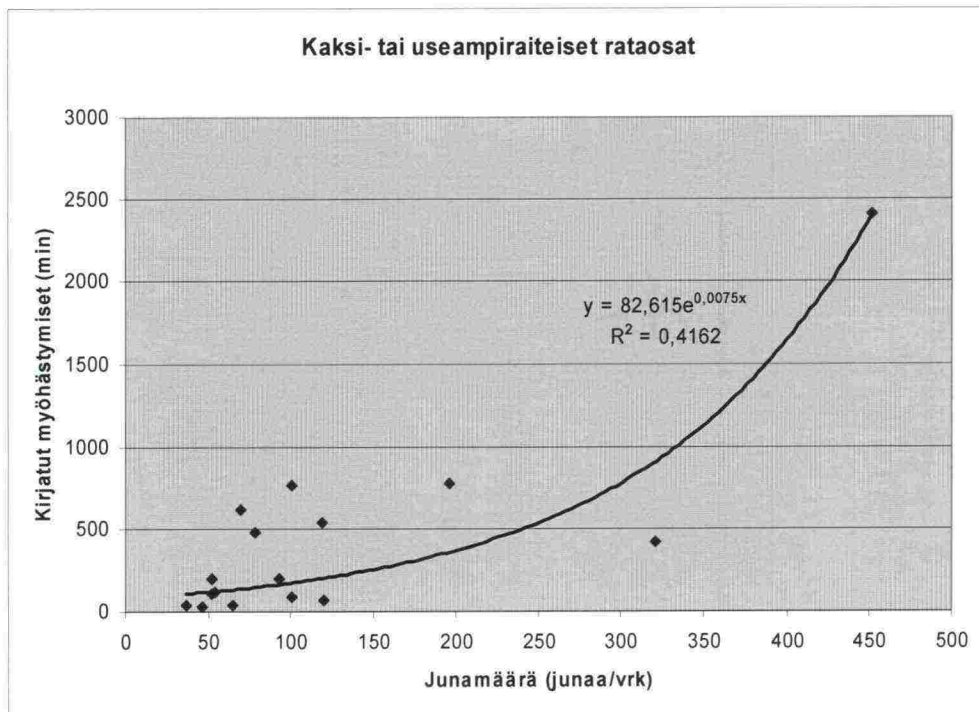
Kuva 50. Kirjattujen kokonaismyöhästymisaikojen ja vastaavien rataosien pisimpien kohtauspaiikkavälien välinen lineaarinen korrelaatio Suomen kaksi- ja useampiraiteisilla rataosilla.

Kuvien 49 ja 50 mukaan kaksi- ja useampiraiteisten rataosien myöhästymisillä ei näytä olevan minkäänlaista korrelaatiota rataosan pisimpien ohituspaikkavälien kanssa. Kuten edellä yksiraiteisten rataosien kohdalla, myös tässä tapauksessa selitysasteet jäävät pieniksi, ja vastoin ennakko-odotuksia regressiosuorien kulmakerroin on molemmissa tapauksissa negatiivinen.

Kuvissa 51 ja 52 on tutkittu kappaleessa 4.12 esitetyn myöhästymisaikateorian mukaisia myöhästymistapausten (kuva 51) ja niistä aiheutuneiden kokonaisviiveiden (kuva 52) korrelaatiota rataosan junamääriin.



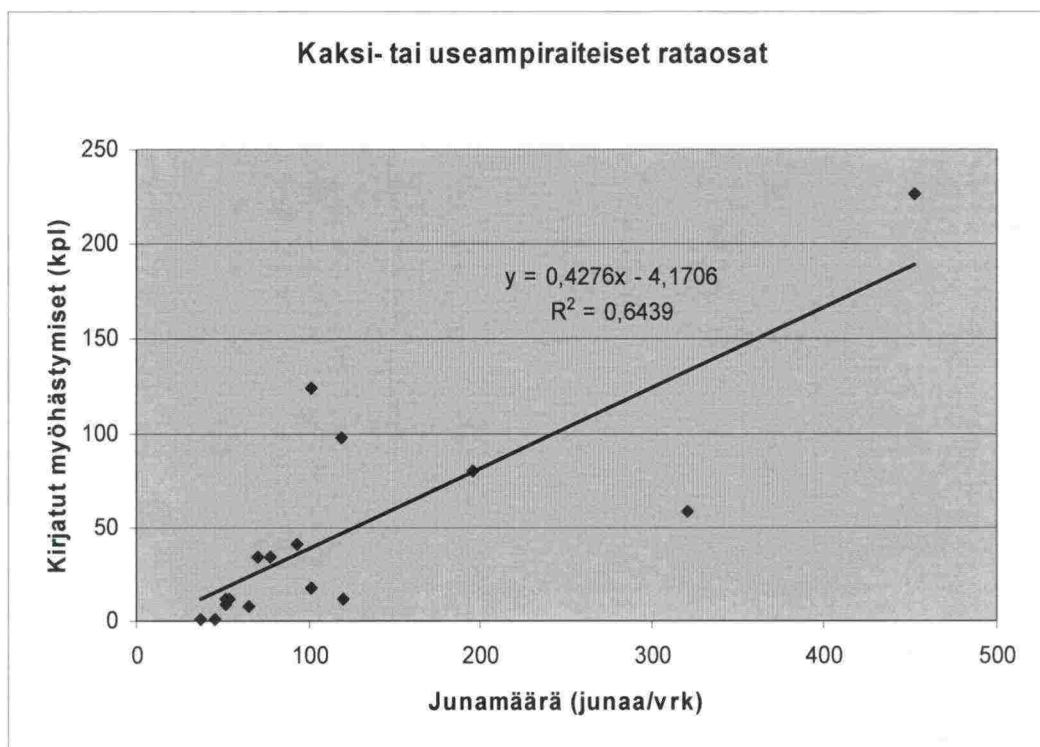
Kuva 51. Myöhästymistapausten ja vastaavien junamäärien välinen eksponentiaalinen korrelaatio Suomen kaksi- ja useampiraiteisilla rataosilla.



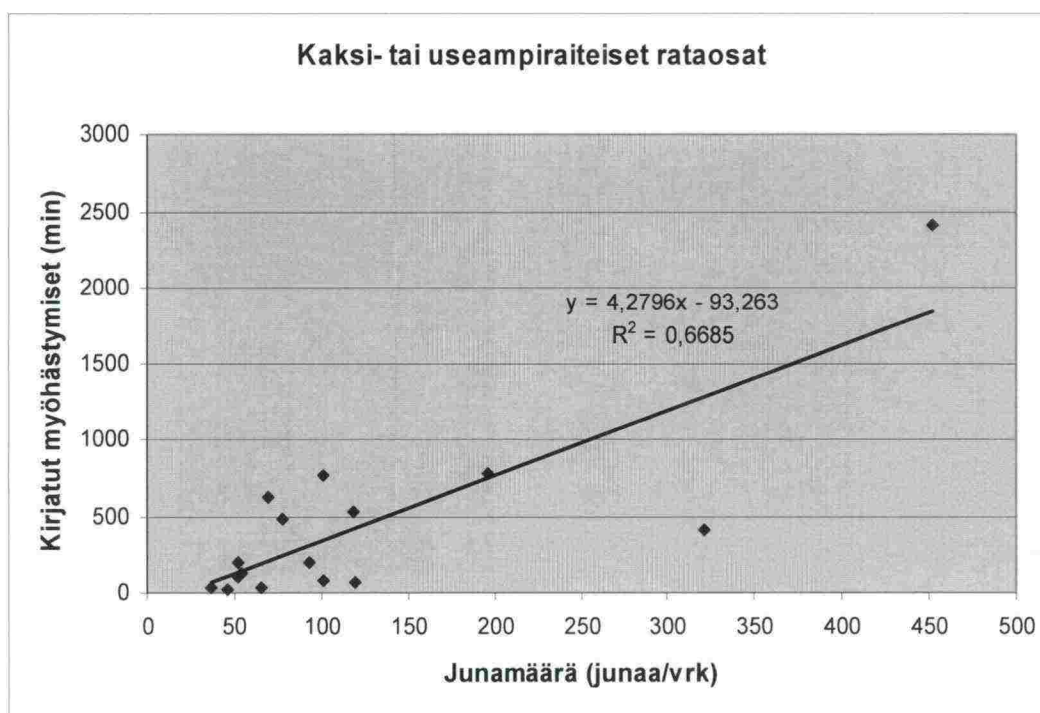
Kuva 52. Kokonaismyöhästymisaikojen ja junamäärien välinen eksponentiaallinen korrelaatio Suomen kaksi- ja useampiraiteisilla rataosilla.

Kuvien 51 ja 52 mukaan eksponentiaalisten käyrien selityssasteet ovat molemmissa tapauksissa yli 0,4, minkä perusteella myös kaksi- ja useampiraiteisilla rataosilla junamäärien ja myöhästymistapausten välillä on lievää korrelaatiota.

Koska yksiraiteisilla rataosilla myöhästymiset korreloivat lineaarisesti paremmin kuin eksponentiaalisesti, tehtiin vastaava kokeilu myös kaksi- ja useampiraiteisille rataosille (kuvat 53 ja 54).



Kuva 53. Myöhästymistapausten ja junamäärien välinen lineaarinen korrelaatio Suomen kaksi- ja useampiraiteisilla rataosilla

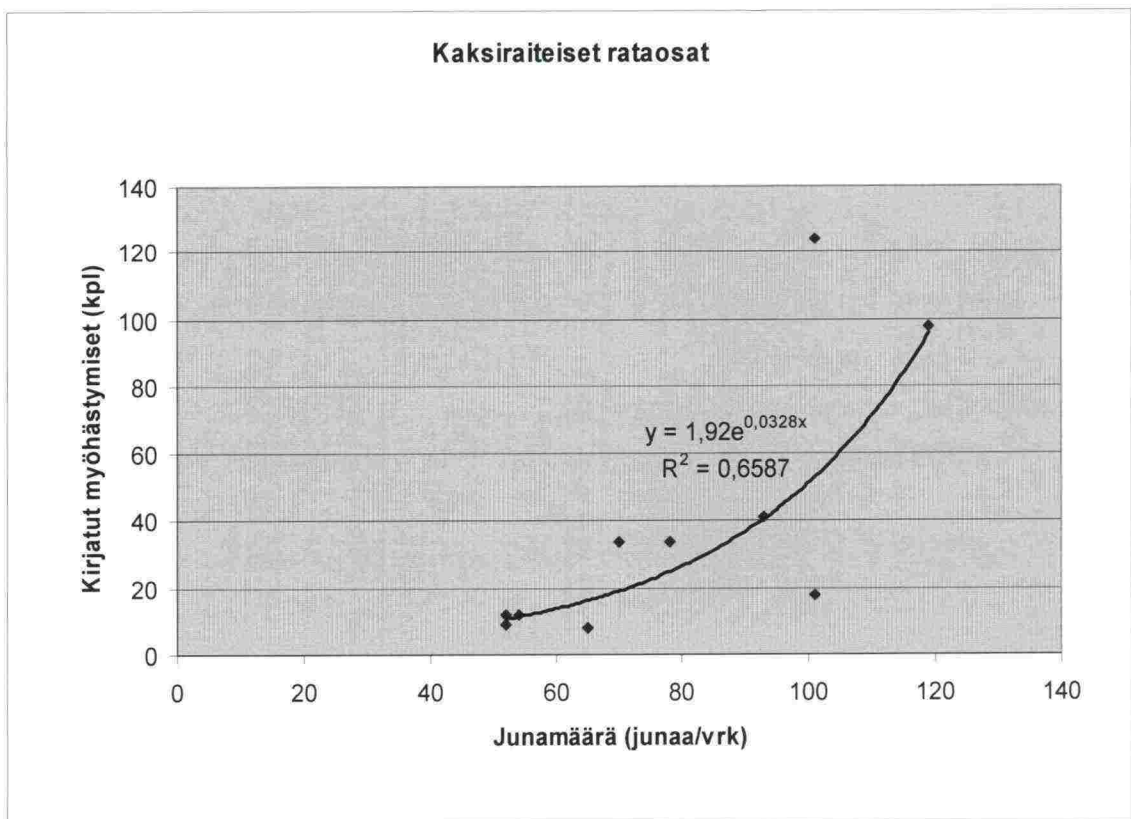


Kuva 54. Kokonaismyöhästymisaikojen ja junamäärien välinen lineaarinen korrelaatio Suomen kaksi- ja useampiraiteisilla rataosilla

Kuvista 53 ja 54 havaitaan, että vastoin kappaleessa 4.12 esiteltyä teoriaa myös tässä tapauksessa lineaarinen malli selittää havaintoja paremmin kuin eksponentiaalinen malli. Regressiosuorien selitysasteet ovat 0,64 ja 0,67. Näiden tu-

lostien perusteella näyttää hyvin todennäköiseltä, että sekä myöhästymistapaudet että niistä aiheutuneet kokonaisviiveet korreloivat vastaavien rataosien junamäärien kanssa.

Tässä kappaleessa on tähän asti käsitelty kaksi- ja useampiraiteisia rataosia yhtenä kokonaisuutena. Syy aineistojen yhdistämiseen on kaksiraiteisten rataosien ja niistä saatavien havaintojen vähäinen lukumäärä. Kun havaintoaineistoa karsitaan poistamalla aineistosta pääkaupunkiseudun useampiraiteiset rataosat, jää jäljelle enää kymmenen havaintopistettä. Kuvassa 55 on esitetty tällä karsitulla aineistolla tehty junamäärien ja myöhästymistapausten välinen eksponentiaalinen korrelaatio.



Kuva 55. Kirjattujen myöhästymistapausten ja vastaavien junamäärien välinen eksponentiaalinen korrelaatio Suomen kaksiraiteisilla rataosilla.

Kuvasta 55 voidaan havaita, että mallin selitysaste kasvaa, kun mukana tarkastelussa on mukana ainoastaan kaksiraiteiset rataosat. Jos kuvan 55 regressiokäyrän perusteella arvioidaan karkeasti kappaleessa 4.12 esitetyn myöhästymisaikateorian mukaista optimaalista junamäärää, kaksiraiteisten rataosien optimaalinen junamäärä on Suomessa luokkaa 80–110 junaa/vuorokausi. Havaintojen lukumäärän vähyden vuoksi tätä tulosta ei kuitenkaan voida pitää tilastollisesti merkitseväenä. Vähäisellä havaintoaineistolla yksittäisillä havaintopisteillä

on suurempi vaikutus regressiokäyrän muotoon, jolloin analyysin tulokset vääristyvät herkästi.

Lähes kaikilla Suomen rataosilla liikennöi sekä tavara- että henkilöjunia. Liikenteen heterogeenisyydellä on vaikutusta myös edellä kuvatun optimaalisen junamäärään suuruuteen. Sellaisilla rataosilla, joissa junien nopeuserot ovat pieniä, optimaalinen junamäärä on todennäköisesti hieman suurempi. Lisäksi kuvan 55 perusteella määritetty tulos kaksiraiteisten rataosien optimaalisesta junamäärästä tarkentuisi, jos tarkasteluun saataisiin mukaan myös tavaraliikenteen myöhästymistapaukset vastaavilta rataosilta.

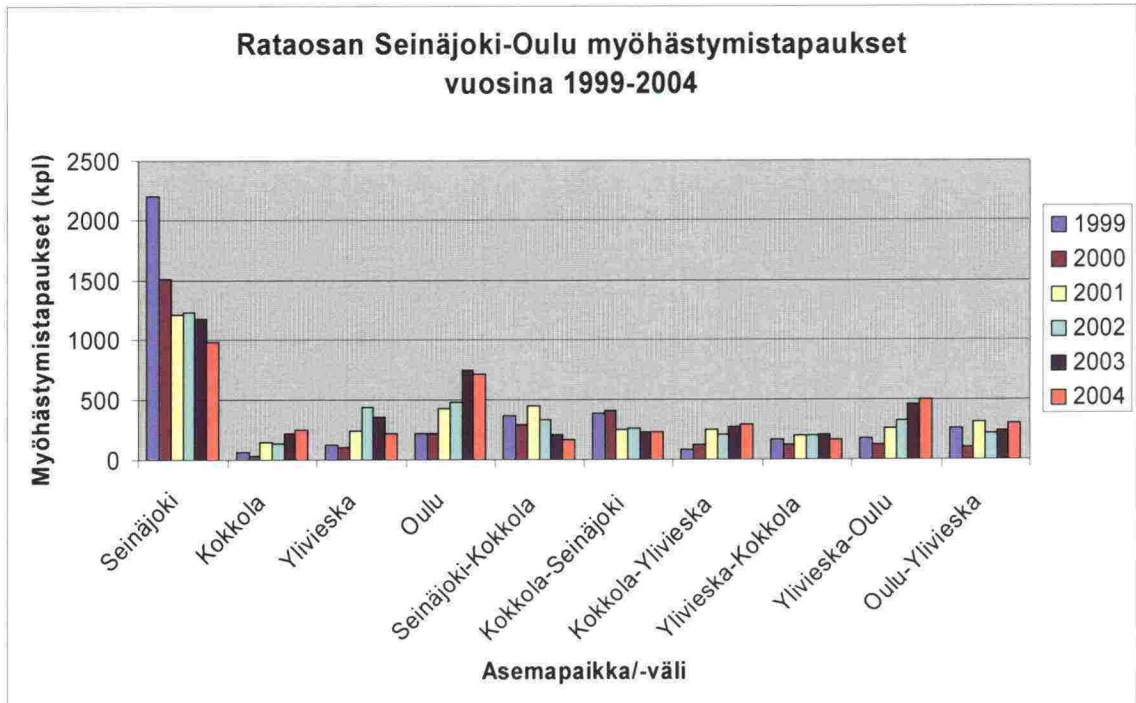
Edellä saatu tulos kaksiraiteisen rataosan optimaalisesta junamäärästä on ristiriitainen kappaleissa 6.3–6.5 esitettyjen kapasiteetin laskentamenetelmien tulosten kanssa. Käytännön kapasiteetin ja optimaalinen junamäärän käsitteiden määritykset eivät ole aivan yhteneviä, mutta samankaltaisilla rataosilla tulosten tulisi olla samaa suuruusluokkaa. Kapasiteettilaskennoissa yksiraiteisen rataosan käytännön kapasiteetiksi saatiin rataosasta ja menetelmästä riippuen 41–130 junaa/vuorokaudessa. Kun näitä käytännön kapasiteetin tuloksia ja edellä saatua tulosta kaksiraiteisten ratojen optimaalisesta junamäärästä (80–110 junaa/vuorokausi) verrataan vastaavien rataosien nykyisiin liikennemääriin, havaitaan, että nyt saatu graafisesti määritelty tulos optimaalisesta junamäärästä on totuudenmukaisempi kuin iso osa kapasiteettilaskentojen tuloksista. Tämän perusteella kappaleiden 6.3–6.5 kapasiteettilaskennoissa italialainen menetelmä oli ainoa, jossa käytännön kapasiteetin tulokset yksiraiteisella rataosalla olivat järjestelmällisesti oikeaa suuruusluokkaa (41–77 junaa/vuorokausi).

6.7 Rataosien Seinäjoki–Oulu ja Luumäki–Imatra myöhästymistapausten vertailu

Edellisessä kappaleessa esitetyn koko Suomen rataverkkoa koskeneen myöhästymistilastojen analysoinnin lisäksi tässä työssä on tarkasteltu tarkemmin tapaus-tutkimusrataosien Seinäjoki–Oulu ja Luumäki–Imatra myöhästymistilastoja. Tämän tarkastelun tavoitteena on selvittää myöhästymistapausten lukumäärien muutosta vuosien 1999–2004 aikana.

Koska nyt käytössä oleva junien kulun seurantajärjestelmä JUSE otettiin varsinaisesti käyttöön vasta vuoden 2005 alusta, perustuvat tässä kappaleessa esitetyt tulokset JUSEa edeltäneeseen junien täsmällisyysseurantajärjestelmän tietoihin. JUSEn tavoin sitä edeltäneessä järjestelmässä myöhästymistapaukset voidaan kirjata joko seuranta-asemina toimiville asemapaikoille tai niiden välisille rataosille.

Rataosan Seinäjoki–Oulu seuranta-asemia ovat Seinäjoen, Kokkolan, Ylivieskan ja Oulun. Kuvassa 56 on esitetty rataosalle Seinäjoki–Oulu vuosien 1999–2004 aikana kirjatut myöhästymiset.



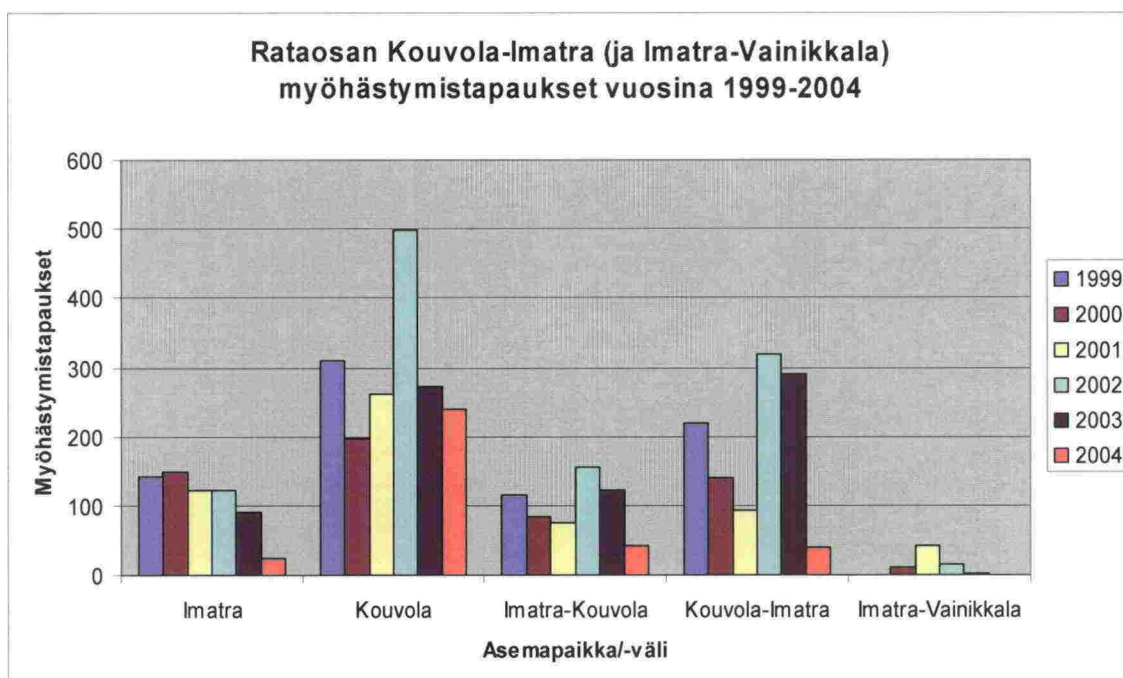
Kuva 56. Vuosien 1998–2004 aikana kaikki L-koodeille kirjatut henkilöjunien myöhästymistapaukset rataosalla Seinäjoki–Oulu.

Kuvasta 56 havaitaan, että Seinäjoki on selvästi ollut Seinäjoki–Oulu -rataosan myöhästymisherkin asema. Seinäjoelle kirjattujen myöhästymistapausten määrä on kuitenkin vähentynyt tarkasteltavalla ajanjaksolla selvästi. Vuoteen 2004 mennessä myöhästymistapausten lukumäärä on vähentynyt alle puoleen vuoden 1999 huippuarvosta. Suuri muutos saattaa ainakin osittain selittyä aikataulurakenteeseen tehdyillä muutoksilla.

Seinäjoen asemasta poiketen rataosan muilla seuranta-asemilla myöhästymistapausten lukumäärä on puolestaan lisääntynyt. Suurin muutos on tapahtunut Oulun asemalla, missä myöhästymistapausten lukumäärä oli vuonna 2004 jo lähes saavuttanut Seinäjoen myöhästymistapausten lukumäärän. Tällainen muutos saattaa kertoa Oulun asemaa ympäröivän rataverkon kapasiteettipulasta.

Asemapaikkojen välille kirjatut myöhästymistapausten lukumäärät ovat pysyneet lähes samansuuruisina kaikilla asemapaikkaväleillä. Suurin muutos on tapahtunut välillä Ylivieska–Oulu, missä Ouluun päin liikennöivien junien myöhästymistapausten lukumäärässä on tapahtunut selvää kasvua. Tämä tulos viittaa siihen, että rataosan junamäärä on lähestynyt kriittistä arvoa, jonka ylittyessä liikennöinti muuttuu häiriöherkäksi.

Rataosan Luumäki–Imatra myöhästymistapauksia ei ole mahdollista tarkastella aivan yhtä yksiselitteisesti, koska Luumäki ei ole seuranta-asema junien täsmällisyysseurantajärjestelmässä. Tästä syystä myöhästymisiä on tarkasteltava rataosalla Kouvola–Imatra. Koska rataosa on kaksiraiteinen välillä Kouvola–Luumäki, voidaan olettaa, että iso osa myöhästymistapauksista on aiheutunut yksiraiteisen rataosan Luumäki–Imatra liikenteellisistä häiriöistä. Kuvassa 57 on esitetty vuosien 1999–2004 aikana kirjattujen myöhästymistapausten lukumäärät rataosalta Kouvola–Imatra. Koska myöhästymistilastoista esiintyi joitain merkin-
töjä myös välille Imatra–Vainikkala, johon sisältyy tarkasteltava rataosa Luumäki–Imatra, on näidenkin tapausten lukumäärä esitetty kuvassa.



Kuva 57. Liikenteellisistä syistä tapahtuneet (L-syykoodilla merkityt) henkilöjunien myöhästymistapaukset rataosilla Kouvola–Imatra (ja Imatra–Vainikkala).

Kuvasta 57 voidaan havaita, että merkittävimmät muutokset Kouvola–Imatra-rataosalla ovat tapahtuneet vuonna 2004, jolloin kirjattujen myöhästymistapausten lukumäärä on vähentynyt edellisvuodesta merkittävästi sekä Imatran asemapaikalla että molempiin ajosuuntiin rataosalla Kouvola–Imatra. Tulos on yllättävä, kun otetaan huomioon, että rataosan junamäärät ovat olleet jatkuvassa kasvussa. Osasyyn tilanteen parantumiseen saattaa olla rataosalla käynnissä olevien perusparannustöillä, joiden yhteydessä vuonna 2004 asennettiin uudet turvalaitteiden välille Lappeenranta–Imatra.

Yhdistämällä eri tietokannoista saatavia tietoja voidaan myöhästymistilastojen avulla muodostaa muitakin tunnuslukuja. Esimerkiksi, jos rataosalla henkilöliikenteen junille kirjatut myöhästymiset suhteutetaan vastaavan rataosan matkusta-

jamääriin, saadaan aikaan tunnusluku, jonka avulla olisi mahdollista arvottaa eri rataosien ongelmia. Tällainen tunnusluku voisi olla hyödyllinen päätöksenteossa esimerkiksi sellaisissa tilanteissa, joissa priorisoidaan kahden tai useamman rataosan uudistus- ja kunnossapitotarpeita.

Taulukossa 13 on esitetty rataosalla Seinäjoki–Oulu ja taulukossa 14 rataosalla Kouvola–Imatra tehtyjen henkilömatkojen lukumäärät vuonna 2004. Taulukoissa esitetyt matkamäärät perustuvat VR:n lipunmyyntitilastoihin (Lahelma 2005).

Taulukko 13. Rataosalla Seinäjoki–Oulu tehtyjen henkilöliikenteen matkojen lukumäärä vuonna 2004 (Lahelma 2005).

Rataosa	Matkat vuonna 2004 (1000 matkaa)
Seinäjoki-Lapua	1145
Lapua-Kauhava	1119
Kauhava-Härmä	1051
Härmä-Pännäinen	1047
Pännäinen-Kokkola	970
Kokkola-Kannus	877
Kannus-Ylivieska	859
Ylivieska-Oulainen	837
Oulainen-Vihanti	848
Vihanti-Ruukki	829
Ruukki-Oulu	838
Matkoja keskimäärin	947

Taulukko 14. Rataosalla Kouvola–Imatra tehtyjen henkilöliikenteen matkojen lukumäärä vuonna 2004 (Lahelma 2005).

Rataosa	Matkat vuonna 2004 (1000 matkaa)
Kouvola-Luumäki	964
Luumäki-Lappeenranta	705
Lappeenranta-Joutseno	491
Joutseno-Imatra	475
Matkoja keskimäärin	659

Kun taulukkojen 13 ja 14 arvoista määritetään keskiarvojen avulla myöhästymistilastoja kirjaamisvälien matkamäärät, voidaan laskea tunnusluku, joka ilmoittaa keskimääräisen myöhästymisten lukumäärään matkustajaa kohden. Taulukossa 15 on esitetty tarkasteltavien rataosien matkustaja- ja myöhästymistapausten määrät sekä niiden avulla lasketut uudet tunnusluvut.

Taulukko 15. Matkustajamääriin suhteutetut myöhästymistapaukset rataosilla Seinäjoki–Oulu ja Kouvola–Imatra.

Rataosa	Rataosan matkat molempiin suuntiin yhteensä vuonna 2004 (1000 matkaa)	Rataosan matkat suunnittain vuonna 2004 (1000 matkaa)	Myöhästymis- tapaukset vuonna 2004 (kpl)	Rataosan myöhästymiset suunnittain 1000 matkustajaa kohden
Seinäjoki-Kokkola	1066	533	165	0,31
Kokkola-Seinäjoki	1066	533	228	0,43
Kokkola-Ylivieska	924	462	290	0,63
Ylivieska-Kokkola	924	462	168	0,36
Ylivieska-Oulu	838	419	500	1,19
Oulu-Ylivieska	838	419	300	0,72
Kouvola-Imatra	659	330	40	0,12
Imatra-Kouvola	659	330	42	0,13

Taulukon 15 tulosten perusteella voidaan havaita, että rataosalla Ylivieska–Oulu Oulun suuntaan kulkevilla junilla on ollut eniten myöhästymistapauksia matkustajamäärään suhteutettuna. Vastaavasti suhteellisesti vähiten myöhästymisistä ovat kärsineet rataosan Kouvola–Imatra matkustajat.

Näin lasketun tunnusluvun luotettavuus on kuitenkin hyvin kyseenalainen sillä menetelmä ottaa huomioon ainoastaan henkilöliikenteelle aiheutuneet myöhästymiset. Tavarajunille olisi mahdollista muodostaa vastaavanlainen tunnusluku jakamalla tavarajunille kirjatut myöhästymistapaukset kuljetettujen bruttotonnien määrällä.

7 KESKEISIMMÄT HAVAINNOT JA JOHTOPÄÄTÖKSET TUTKIMUKSESTA

Tämän työn aikana on useaan kertaan korostettu kansainvälisen rautatieliiton UIC:n määrittystä kapasiteetin suhteellisuudesta ja siitä, ettei ratakapasiteetille ole mahdollista muodostaa yleispätevää laskentakaavaa. Tässä työssä on esitelty useita analyyttisiä menetelmiä kapasiteettitarkasteluihin, vaikka osa menetelmistä vaikuttaa lupaavilta, ovat ne kaikki yksinkertaistuksia todellisesta maailmasta. Tästä syystä jokaisessa menetelmässä on pieniä puutteita, jotka vääristävät laskennoista saatavia lopputuloksia.

Kapasiteettitarkasteluissa voidaan laskea joko tietyn rataosan maksimiliikennesuoritetta tarkasteltavaa ajanjaksoa kohden (kapasiteettilaskennat) tai liikennöin varaamaa kokonaisaika suhteessa tarkasteltavaan ajanjaksoon (kapasiteetin käyttöasteen laskennat). Kapasiteetin käyttöasteen laskentamenetelmillä saadaan tarkempia ja todenmukaisempia tuloksia, mutta ne eivät sovellu tulevaisuuden tilanteiden ennustamiseen tai toimenpidevaihtoehtojen vertailuun ilman, että jokaiselle tarkasteltavan vaihtoehdon liikennetilanteelle laaditaan aikataulu. Jotta kapasiteetin käyttöasteen laskennoista saadut tulokset ovat käyttökelpoisia, tulisi Suomessa ensin määrittää tulosten perusteella määritettävien palvelutasojen raja-arvot. Yleinen käsitys Euroopassa on se, että liikenteen hoitaminen täsmällisesti vaikeutuu merkittävästi, jos kapasiteetin käyttöaste on enemmän kuin 80 prosenttia. Tätä pidetäänkin monessa maassa suurimman sallitun kapasiteetin käyttöasteen raja-arvona.

Kapasiteetin laskentamenetelmät ovat usein nopeampikäyttöisiä vähäisempien lähtöaineistovaatimuksiensa vuoksi kuin kapasiteetin käyttöasteen laskentamenetelmät, mutta niiden suurin ongelma on yksinkertaistumisista aiheutuva tulosten vääristyminen. Verrattaessa tapaustutkimuksissa saatuja käytännön kapasiteetin arvoja tarkasteltavien rataosien nykyisiin junamääriin havaitaan, ettei yhdelläkään tarkastellulla menetelmällä saada täysin käytännön havaintoja vastaavia arvoja. Puolalaisella menetelmällä ja CAPACITY-mallilla saadut kapasiteetti-arvot ovat järjestelmällisesti liian suuria. Italialainen menetelmä antoi puolestaan tulokseksi kolmelle kuudesta tutkituista rataosista liian vähäisen kapasiteetin arvon, mutta muilla rataosilla tulokset olivat karkeasti arvioiden oikean suuruisia. Tästä johtuen tarkasteltuja menetelmiä olisi kalibroitava korjauskertoimien ja lisätermien avulla Suomen olosuhteisiin paremmin soveltuviksi ennen kuin minkään esitellyn menetelmän tuloksia voidaan käyttää esimerkiksi päätöksenteon apuvä-

lineenä. Yleisin syy liian suuriin kapasiteettiarvoihin on kiihdytyksistä ja hidastamisista aiheutuvan ajoaikoja lisäävän vaikutuksen puuttuminen.

Oman haasteensa kapasiteettianalyysiin tuovat erityisesti monimutkaisempien menetelmien tarvitsemat lähtötiedot. Työssä tehtyjen tapaustutkimusten yhteydessä kävi ilmi, ettei kaikkia menetelmien vaatimia lähtötietoja ole välttämättä helposti saatavilla. Esimerkiksi junien ajonopeudet, pysähdysten kestot ja niiden lukumäärät tuli määrittää manuaalisesti graafisen aikataulun perusteella. Lisäksi osaa menetelmistä ei voida suositella käytettäväksi esimerkiksi toimenpidevertailuissa, koska ne vaativat lähtötiedokseen valmiin aikataulun.

Tapaustutkimuksissa käytetyistä kapasiteetin laskentamenetelmistä puolalainen menetelmä oli selvästi yksinkertaisin, mutta samalla myös kaikista johdonmukaisin. Puolalaisella menetelmällä saadut tulokset ovat kuitenkin noin kaksinkertaisia nykyisiin junamääriin verrattuna, eikä sen käyttöä voida suositella ilman että mallin parametrien määritysperiaatteita tarkennetaan. Puolalainen menetelmä on johdonmukaisuutensa vuoksi tarkastelluista menetelmistä kuitenkin ainoa, jonka käyttöä voidaan suositella edes suhteelliseen vertailutarkasteluissa ilman, että tarkasteltaviin malleihin tehdään mitään muutoksia. Italialaisella menetelmällä ja CAPACITY-mallilla saadaan todennäköisesti kuitenkin puolalista menetelmää tarkempia tuloksia, jos menetelmien tarkkuutta ja luotettavuutta parannetaan korjauskertoimien ja lisätermien avulla.

Italialaisen menetelmä on laskentaperiaatteiltaan hyvin samanlainen kuin puolalainen menetelmä. Italialaisen menetelmä perustuu puolalaisen menetelmän tavoin junien ajoaikoihin kriittisellä liikennepaikkavälillä. Menetelmällä saadut tulokset ovat suuruusluokaltaan todenmukaisempia kuin puolalaisen menetelmän, mutta italialaisen menetelmän ongelmaksi muodostuu se, että siinä määritetään yhteinen keskimääräinen viive sekä tavara- että henkilöjunille. Tämä oletus aiheuttaa laskentatuloksen vääristymisen sellaisilla rataosilla, joissa tavarajunat aikataulumukaisesti pysähtyvät kohtauspaikoille pitkiksi ajoiksi. Vastaavasti sellaisilla rataosilla, joissa tavarajunilla ei ollut pitkiä aikataulunmukaisia pysähdyksiä, italialaisen menetelmän tulokset olivat tarkempia kuin kahdella muulla tarkasteltavalla menetelmällä saadut.

CAPACITY-mallia saatavia tuloksia voidaan todennäköisesti parantaa lisäämällä malliin korjauskerroin, joka vähentää junien ajonopeuden vaikutusta ajoaikoihin. CAPACITY-mallin kehittämistä on suositeltavaa jatkaa Suomessa, koska menetelmä on yksi harvoista, joka soveltuu sekä yksi- että kaksiraiteisille radoille eikä se tarvitse valmista aikataulua lähtötiedokseen. CAPACITY-mallin etuna on myös sen ominaisuus muodostaa suhteellinen jakauma erilaisten peräkkäin ajavien junatyyppeiden yhdistelmistä.

Yleisesti ottaen kapasiteetin laskentamenetelmillä saatavat tulokset saadaan sitä tarkemmiksi mitä enemmän ja mitä luotettavampia lähtötietoja malleihin saadaan syötettyä. Tapaustutkimuksessa tarkastelluista menetelmistä CAPACITY-malli pystyy tietokoneavusteisena käsittelemään todella yksityiskohtaisia lähtötietoja. Rataosan Seinäjoki–Oulu kapasiteettilaskennassa junat olivat jaettu neljään ryhmään, mutta itse taulukkolaskentaohjelmaan syötettynä menetelmään olisi voitu muodostaa kymmeniä junatyyppejä.

Myöhästymistilastojen analysointi osoitti, että junien kulun seurantajärjestelmään JUSEen kirjattavien myöhästymistapausten kirjaamisperiaatteet eivät ole yhtenäisiä. Esimerkiksi rataosan Helsinki–Tampere myöhästymistapauksia on kirjattu JUSEen mm. väleille Helsinki–Tikkurila, Helsinki–Riihimäki, Riihimäki–Tikkurila ja Hämeenlinna–Riihimäki. Koska myöhästymistapausten kirjaus riippuu junien pysähdyspaikoista ja liikenteenohjaajan kirjaamiskäytännöstä, on mahdotonta sanoa, missä yksittäisen myöhästymisen aiheuttanut tapahtuma on todellisuudessa sijainnut.

Myöhästymistilastojen analyysin tulosten perusteella voidaan olettaa, että myös Suomessa myöhästymistapausten perusteella on mahdollista tutkia rataosien välityskykyä ja saada aikaan myöhästymisaikateorian mukainen eksponentiaalinen korrelaatio myöhästymisten lukumäärän ja vastaavien junamäärien välille. Tämä tutkimus kannattaakin uusia esimerkiksi muutaman vuoden kuluttua, kun JUSEn kirjaamisperiaatteet ovat todennäköisesti yhtenäistyneet, ja JUSEssa on saatavilla enemmän tilastotietoa analyysin lähtötiedoksi.

Tässä työssä tehtyjen myöhästymistilastojen analysoinnin perusteella Suomen kaksiraiteisten rataosien optimaalinen junamääräksi arvioitiin noin 80–110 junaa/vuorokausi (molemmat suunnat yhteensä). Vaikka optimaalinen junamäärä ei ole käsitteenä sama kuin käytännön kapasiteetti, on edellä esitetyn tulos selvästi ristiriitainen esimerkiksi CAPACITY-mallilla saatujen käytännön kapasiteetin arvojen kanssa. Tapaustutkimuksissa CAPACITY-mallilla yksiraiteisille rataosille saatiin käytännön kapasiteetin arvoiksi 73–130 junaa vuorokaudessa. Toisin sanoen CAPACITY-mallilla saadut tulokset ovat raiteiden lukumäärään suhteutettuna noin kaksinkertaisia edellä esitettyyn kaksiraiteisten rataosien optimijunamäärään verrattuna. Kun molempia edellä esitettyjä tuloksia verrataan Suomen rataverkon nykyisiin junamääriin, on perusteltua olettaa, että myöhästymistilastojen perusteelta määritetty optimaalinen junamäärä on selvästi todenmukaisempi tulos.

Työn aikana on lisäksi tullut esille useita sellaisia asioita, joita Suomessa ei ole vielä varsinaisesti tutkittu tai kartoitettu. Yksi ajankohtaisimmista jatkotutkimusaiheista on UIC 406 -laskentamenetelmän laajempi käyttöönotto Suomessa. Menetelmä on otettu Euroopassa laajalti käyttöön ja kokemukset ovat olleet erit-

täin positiivisia. Jo tässä työssä tehty kahden rataosan huipputunnin kapasiteetin käyttöasteenlaskenta osoitti, että menetelmä on suhteellisen raskas, jos lähtötiedot joudutaan keräämään manuaalisesti graafisista aikatauluista. Tästä johtuen on suositeltavaa, että laajempi kapasiteetin käyttöasteen laskenta tehdään tietokoneavusteisesti. Useat Euroopan maat, kuten Ruotsi ja Itävallat, ovat sisällyttäneet UIC:n laskentamenetelmän käytössä oleviin aikatauluohjelmiin.

Kapasiteettiin määrään vaikuttavista tekijöistä aikataulusuunnittelu on ainoa, johon voidaan vaikuttaa ilman varsinaisia radan parannustöitä. Huonosti suunnitellulla aikataululla voidaan hukata paljon kapasiteettia, jota muuten voitaisiin hyödyntää esimerkiksi mahdollisten ylimääraisille junille. Tästä johtuen aikatauluviivojen vaihtoehtoisia piirtämis- ja sijoittelutekniikoita olisi aiheellista selvittää matemaattiselta ja käytännölliseltä kannalta laajemmassa tutkimuksessa.

Jatkotutkimus voitaisiin tehdä myös kapasiteettiasioden paremmasta huomioinnottamisesta päätöksenteossa. Investointipäätöstentekoa voitaisiin yrittää selkeyttää kapasiteetin laskentamenetelmien pohjalta kehitettävällä arvottamismenetelmällä. Ratahankkeet voitaisiin pyrkiä arvioimaan esimerkiksi uuden tunnusluvun avulla, joka ilmoittaisi investoinnin avulla syntyvän lisäkapasiteetin suhteutettuna käytettävään investointisummaan nähden (lisäjunia/euro). Ennen varsinaista käyttöönottoa tällaisen menetelmän luotettavuus ja herkkyys eri muuttujille on selvitettävä tarkasti, koska tällaisen menetelmän riskinä on se, että se ohjaa päätöksentekoa ainoataan yhteen suuntaan. Useiden kapasiteetin laskentamenetelmien tulokset ovat pitkälti riippuvaisia junien ajoajoista rataosan kriittisellä välillä. Jos tällaista menetelmää käytetään uuden tunnusluvun kehittämisen pohjana, on mahdollista, että uusi työkalu suosittelee liian herkästi uuden kohtauspaikan rakentamista rataosan kriittiselle välille.

LÄHDELUETTELO

Alåsen, M. 1999. Från booster till auto. Nordisk infrastruktur 2/1999. Medact Press. Stockholm, Sverige. S. 24–25.

Barter, W. 2004. Forecasting robustness of timetables. Computers in Railways IX. WIT Press. Southampton, UK. S. 563–572.

Blomqvist, E. 2005. Täsmällisyyskoordinaattori Egon Blomqvistin haastattelu. VR Osaakeyhtiö, Helsinki. 23.2.2005.

Čapek, K. 2005. Tutkija, Diplomi-insinööri Karel Čapekin haastattelu. Teknillinen korkeakoulu, Espoo. 21.5.2005.

Carey, M., Kroon, L., Wendler, E., Hansen, I. 2005. Heuristics, analysis or simulation- which approach leads to best result? Forum discussion. 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. 9.6.2005. Delft, Alankomaat.

Chandesris, M. 2005 Capacity Management and level-of-service. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis 8–10.6.2005. Delft, Alankomaat.

Crenca, D., Malavasi, G., Ricci, S. 2005. Dependence of railway lines carrying capacity by signaling system and track geometry. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis 8–10.6.2005. Delft, Alankomaat.

Galaverna, M. 1998. Influence of signalling systems on traffic capacity of urban railways. Rail Engineering International. Volume 27, number 3 1998. De Rooi Publications. s. 11–13.

Galaverna, M., Sciutto, G. 2004. Simulation based calibration of analytical models for line traffic capacity. Computers in Railways IX. WIT Press. Southampton, UK. s. 83–91.

Grimm, M. 2005. Simulation as a Method of Analysing the Capacity of a Railway System. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis 8–10.6.2005. Delft, Alankomaat.

Hirai, C., Tomii, N. 1998. Evaluation of Train Interval Adjustment Algorithms for Congested Metropolitan Railway Lines. Quarterly Report of RTRI, Vol. 39, No 4. Railway Technical Research Institute. Tokyo, Japan. S. 191–197.

Hovi, S. 2005. Suunnittelija Sami Hovin haastattelu. VR-Rata Oy, Helsinki. 9.3.2005.

Höllmüller, J., Klahn, V. 2005. Implementation of the UIC 406 Capacity Calculation at Austrian Railways (ÖBB). Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. 8–10.6.2005. Delft, Alankomaat.

Junnila, J. 1974. Yksiraiteisen radan liikenteen välityskyvyn parantaminen. Lissensiaattityö. Teknillisen korkeakoulun rakennusinsinööriosasto. Espoo. 99 s.

Kaas, A. 1998. Fokus på tiltag, som kan fremme jernbanesystemernes kapacitet. Nordisk Järnbane Tidskrift. 5/1998. NJS. Kööpenhamina, Tanska. S. 16–17.

Kandels, C., Gröger, T. 2005. Declaration of Congested Infrastructure in the Network Statement of the Infrastructure Manager Deutsche Bahn. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis 8–10.6.2005. Delft, Alankomaat.

Kosonen, T. 2005. Diplomi-insinööri Tero Kososen haastattelu. VR-Rata Oy, Helsinki. 23.3.2005 ja 15.9.2005.

Lahelma, H. 2005. Ylitarkastaja Harri Lahelman haastattelu. Ratahallintokeskus, Helsinki. 25.10.2005.

Landex, A., Kaas, A.. 2005. Planning the most suitable travel speed for high frequency railway lines. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis 8–10.6.2005. Delft, Alankomaat

Manninen, M. 2005. Ylitarkastaja Maria Mannisen haastattelu. Ratahallintokeskus, Helsinki. 8.9.2005.

- Mattson, L-G. 2005. Ways of Deriving Train Delay Relationships. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis 8–10.6.2005. Delft, Alankomaat
- Moreira, N., Viegas, J., Macário, R., Garcia, L. 2003. Capacity evaluation models for medium term planning and capacity evolution modelling for long term planning. WCCR 2003 (The World Congress on Railway Research). Edinburgh. S. 1044–1059.
- Moreira, N., Garcia, L., Catarrinho, P. 2004. Network capacity. Computers in Railways IX. WIT Press. Southampton, UK. S. 35–43.
- Mäkelä, T., Säily, S., Mäntynen, J. 2002. Rautatieliikenne. Tampereen teknillinen korkeakoulu, liikenne- ja kuljetustekniikka. Tampere. 182 s.
- Mäkitalo, M. 2000. Ratakapasiteetin perusteet. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2000. Ratahallintokeskus. Helsinki. 66 s.
- Mäkitalo, M. 2001. Vakioaikataulu junaliikenteen ja rautatieinfrastruktuurin kehittämiseksi. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2001. Helsinki. 120 s.
- Mäkitalo, M. 2003. Aikataulu ja ratakapasiteetti – mitä eroa? Rautatietekniikka 3/2003. S. 38.
- Mäkitalo, M., Paasikivi, J., Mäkilä, M. 2004. Ratakapasiteetin jakamisen vaatimukset ja liikenteen suunnittelun nykytila. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 7/2004. Helsinki. 33 s.
- Niemimuukko, H. 2004. Rautatieliikenteen turvallisuus. Ratahallintokeskus, Turvallisuusyksikkö. Helsinki.
- Nummelin, M. 2005. Ratahallintokeskus 10 vuotta. Ratahallintokeskus. Gummerus kirjapaino Oy, Jyväskylä. 105 s.
- Oksanen, J. 2005. Liikennesuunnittelupäällikkö Jarmo Oksasen haastattelu. VR Osakeyhtiö. 8.9.2005, Helsinki.

Pachl, J. 2002. Railway Operation and Control. VTD Rail Publishing. Mountlake Terrace, WA, USA. 239 s.

Pachl, J. 2005. Professori Joern Pachlin haastattelu sähköpostitse 4.4.2005 sekä 9.6.2005 Delftissä, Alankomaissa.

Pellandini, G. 2001. Infrastructure – Traffic: Timetable and Co-ordination as Central Elements. Gabriele Pellandinin Ratahallintokeskuksessa 5.6.2001 pitämän esitelmän esittelymateriaali.. Helsinki.

Peltohaka, T. 1972. Kouvolan ratapihan itäpään kehittämisvaihtoehdot. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto. Espoo. 68 s.

Pussinen, J. 2005. Sähköpostikeskustelu suunnitteluinsinööri Jyrki Pussisen kanssa. VR Osakeyhtiö, Helsinki, 9.5.2005.

Raaska, T. 2004. JUSE on otettu käyttöön. Ratahallintokeskuksen sisäinen tiedote, 25.11.2004. Ratahallintokeskus, Helsinki. 1 s.

Ratahallintokeskus 1998. Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 6 – Turvalaitteet. VR Kirjapaino, Helsinki. 117 s.

Ratahallintokeskus 1999. Rataverkon kapasiteetin käyttöaste. Loppuraportti 17.2.1999. Ratahallintokeskus, Helsinki. 5 s.

Ratahallintokeskus 2002a Kapasiteetin kokonaisselvitys, Etelä-Suomen rataverkko. Loppuraportti 31.10.2002. Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus 2002b. Luumäki–Imatra T kaksoisraideselvitys. Ratahallintokeskus, Helsinki. 46 s.

Ratahallintokeskus 2003a. Luettelo rautatieliikennepaikoista 1.6.2003. Ratahallintokeskuksen julkaisuja F2. Ratahallintokeskus, kunnossapitoyksikkö. Helsinki.

Ratahallintokeskus 2003b. Seinäjoki–Oulu tarveselvitys. Ratahallintokeskus, Helsinki. 70 s.

Ratahallintokeskus 2004a. Pääreitiselvitys. Loppuraportti 12.11.2004. Ratahallintokeskus, Helsinki. 33 s.

Ratahallintokeskus 2005a. Kaakkois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen hallinta. Työpajan 15.9.2005 taustamateriaali. 19 s.

Ratahallintokeskus 2005b. Ratahallintokeskuksen rataverkko 1.1.2005 -kartta. Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus 2005c. Säännöllisen liikenteen ratakapasiteetin muutos aikataulukauden 2005 aikana. Päätös 31.8.2005 liitteineen. Ratahallintokeskus, Helsinki.

RHK ks. Ratahallintokeskus

Robinson, M. 1998. Getting the most out of rail infrastructure. Modern Railways. 10/1998. Ian Allan Publishing Ltd. Surrey, United Kingdom. S. 694–696.

Ronni, J. 1994. Helsinki–Turku -radan liikenteenhoitomallit ja kehitysvaihtoehdot. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 128 s.

Ronni, J. 2005. Sähköpostikeskustelu pääsuunnittelija Jukka Ronnin kanssa. Ratahallintokeskus, Helsinki, 14.10.2005.

Takahashi, T. 1962. Theories of Track Capacity Calculation. Japanese Railway Engineering, September 1962, Vol. 3 No. 3. Japan Railway Engineers' Association, Tokyo, Japan. s. 22–26.

Tawast, H. J. 1974. Yksiraiteisen radan aikataulu- ja kuljetuskapasiteetti rataosalla Pieksamäki – Kuopio. Rautatieliikenne, 12/1974. Rautatievirkamiesliitto ry. Helsinki.

Tomii, N. 1999. Urban Transportation Technology Project. Quarterly Report of RTRI. Vol. 40, No. 4. Railway Technical Research Institute. Tokyo, Japan.

UIC (Union Internationale des Chemins de fer) 2004. Code 406, Capacity. 1st edition, June 2004. 22 s.

Viegas, J., Macário, R., Marques, C., van der Hoofd, M., Moreira, N., Rivier, R., Putallaz, Y., Dekker, R., den Hertog, D., Kuijpers, C., Hooymans, M., Trompet, M., Bouf, D., Montfort, J., Akermann, H-R., Danzer, P. 2003. IMPROVERAIL –

Deliverable 6 – Methods for Capacity and Resource Management. Lisbon, June.2003. 225 s.

VR 2003. Rataverkon junaliikenne keskimäärin arkipäivinä, maaliskuussa 2003 - kartta. VR Osakeyhtiö, käyttöosasto. Helsinki.

Wahlborg, M. 2004. Banverket experiences of capacity calculations according to the UIC capacity leaflet. Computers in Railways IX. WIT Press. Southampton, UK. s. 665–673.

Wahlborg, M. 2005. Application of the UIC 406 capacity leaflet at Banverket. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Delft, Alankomaat, 8–10.6.2005.

Wendler, E. 2005. On waiting times of scheduled train paths in non-cyclic timetables. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Delft, Alankomaat, 8–10.6.2005.

Yamagishi, T. 1942. Theory of Railway Track Capacity and Its Application. Bulletin of the Railway Technical Research Institute. Vol 1 No.5, June 10, 1942. Japanese Government Railways. Tokyo.

Yuan, J., Hansen, I. 2004. A. Analysis of scheduled and real capacity utilisation at a major Dutch railway station. Computers in Railways IX. WIT Press. Southampton, UK. s. 593–646.

Varsinaisessa lähdeluettelossa mainittujen haastatteluiden lisäksi on tämän työn aikana haastateltu useita koti- ja ulkomaisia asiantuntijoita kahden kesken sekä sähköpostin välityksellä. Vaikka näihin keskusteluihin ei tässä työssä ole suoranaisesti viitattu, ovat haastatelluilta saadut tiedot edistäneet tätä työtä sekä tukeneet tässä työssä esitettyjä selvitys- ja tutkimustuloksia. Lähdeluettelossa esiintyvien haastatteluiden lisäksi työn aikana haastateltiin seuraavia henkilöitä:

- Ylitarkastaja Miika Mäkitalo, Ratahallintokeskus (keskustelut 14.2–20.10.2005)
- Ylitarkastaja Mikko Natunen, Ratahallintokeskus (keskustelut 14.2.–20.10.2005)
- Ylitarkastaja Tapio Raaska, Ratahallintokeskus (haastattelu 22.2.2005)

- Magnus Wahlborg, Banverket (sähköpostikeskustelut 4.4.2005 ja 18.7.2005 sekä keskustelu 9.6.2005)
- Professori Joern Pacht, Technical University Braunschweig (sähköpostikeskustelu 4.4.2005 sekä keskustelu 9.6.2005)
- Professori Nuno Moreira, Instituto Superior Técnico (sähköpostikeskustelu 5.4.2005)
- Ylitarkastaja Heidi Niemimuukko, Ratahallintokeskus (haastattelu 6.4.2005)
- Professori Ekkehard Wendler, Aachen University (sähköpostikeskustelu 3.5.2005)
- Ekonomisti Ronald Mauri, Volpe Central (sähköpostikeskustelu 9.5.2005)
- Engineering Psychologist Mary Lee, Volpe Central (sähköpostikeskustelu 13.5.2005)
- Ylitarkastaja Tapio Peltohaka, Ratahallintokeskus (haastattelu 10.5.2005)
- Alex Wardrop, TMG International (Australia) (keskustelu 9.6.2005)
- DI Volker Klahn, IBS, Hannover (keskustelu 9.6.2005)
- Johtaja Norio Tomii, Railway Technical Research Institute, Tokyo (keskustelu 10.6.2005)
- Maguelonne Chandèsris, SNCF (keskustelu 11.6.2005)
- Yksikön päällikkö Veli-Matti Kantamaa, Ratahallintokeskus (haastattelu 9.9.2005)

8 LIITTEET

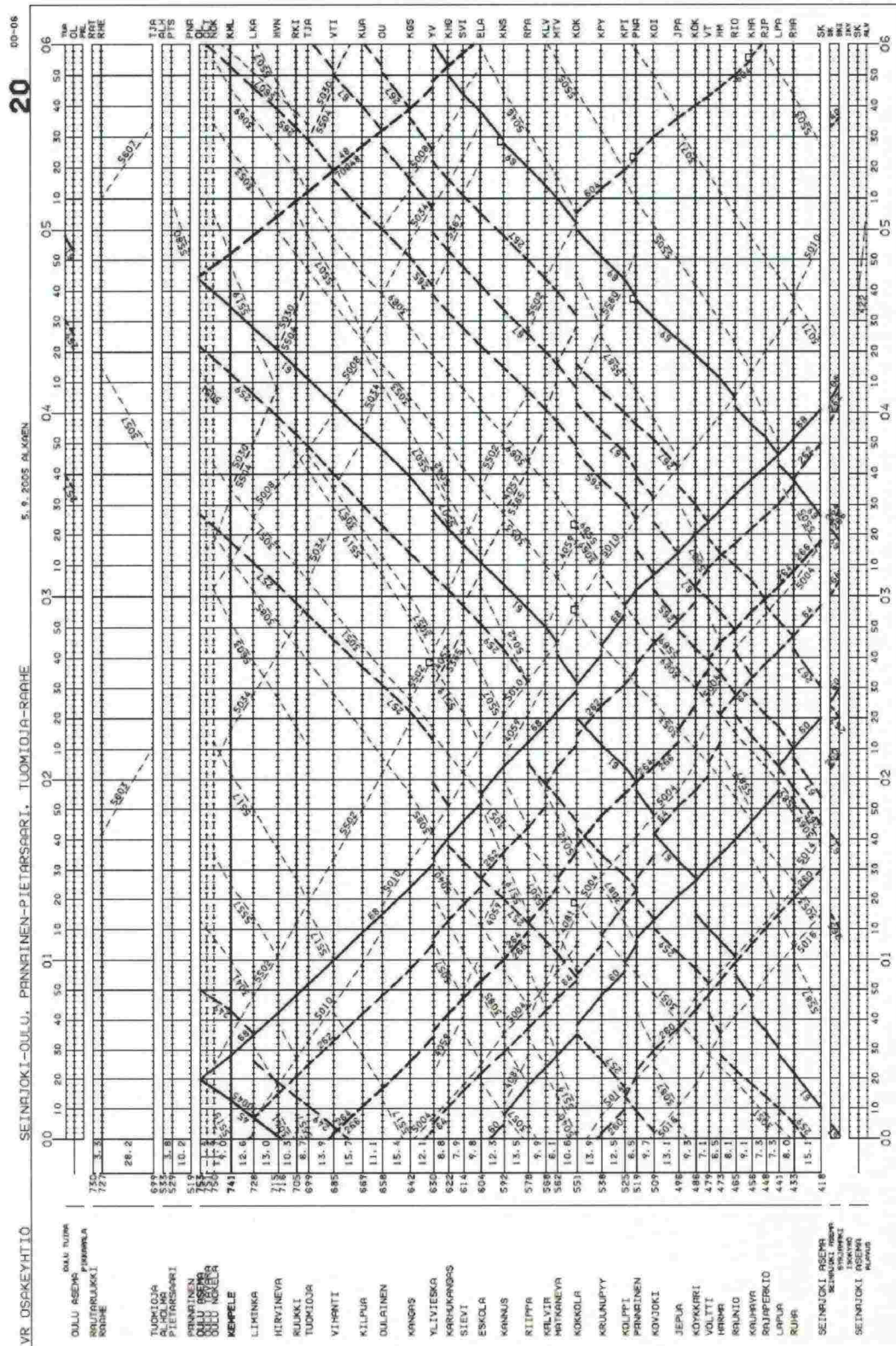
- LIITE 1** JUSEen kirjattujen myöhästymisten syykoodit ja niiden selitykset
- LIITE 2** Rataosan Seinäjoki–Oulu 5.9.2005 alkaen voimassaoleva graafinen aikataulu
- LIITE 3** Luettelo säännöllisesti liikennöivistä tavarajunista rataosalla Seinäjoki–Oulu
- LIITE 4** Rataosan Kouvola–Imatra 5.9.2005 alkaen voimassa oleva graafinen aikataulu
- LIITE 5** Luettelo säännöllisesti liikennöivistä tavarajunista rataosalla Kouvola–Imatra

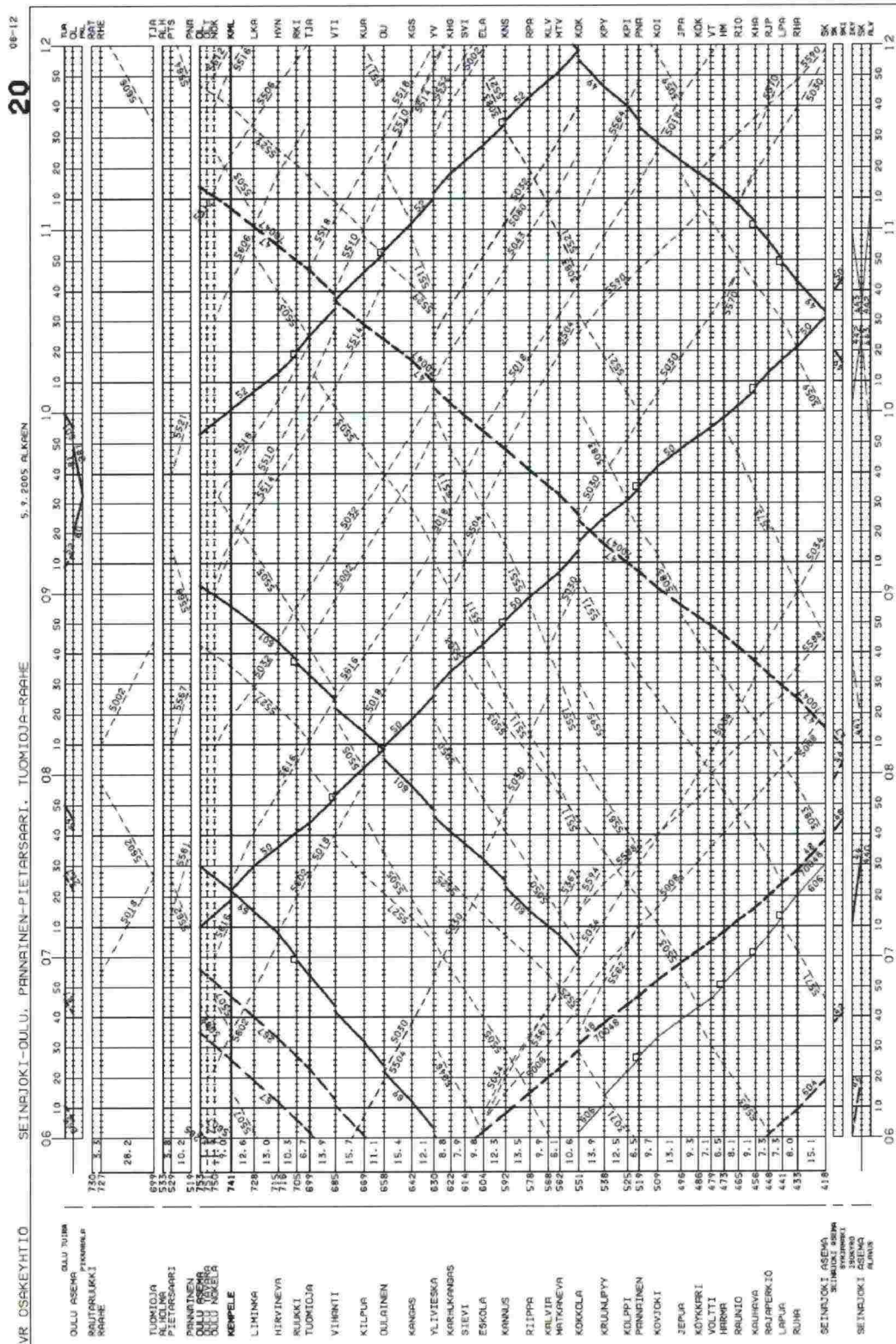
JUSEen kirjattujen myöhästymisten syykoodit ja niiden selitykset (Blomqvist 2005)

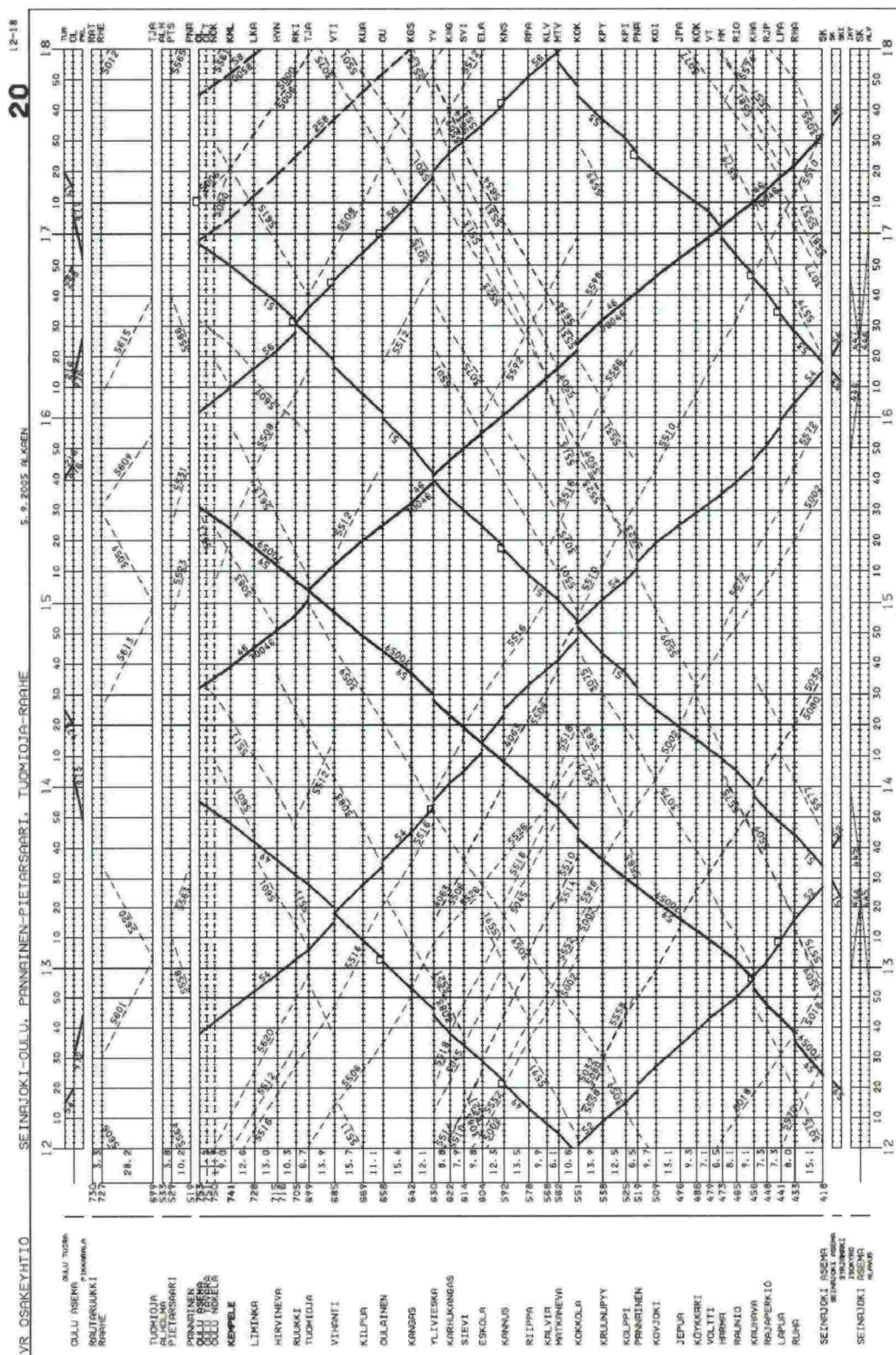


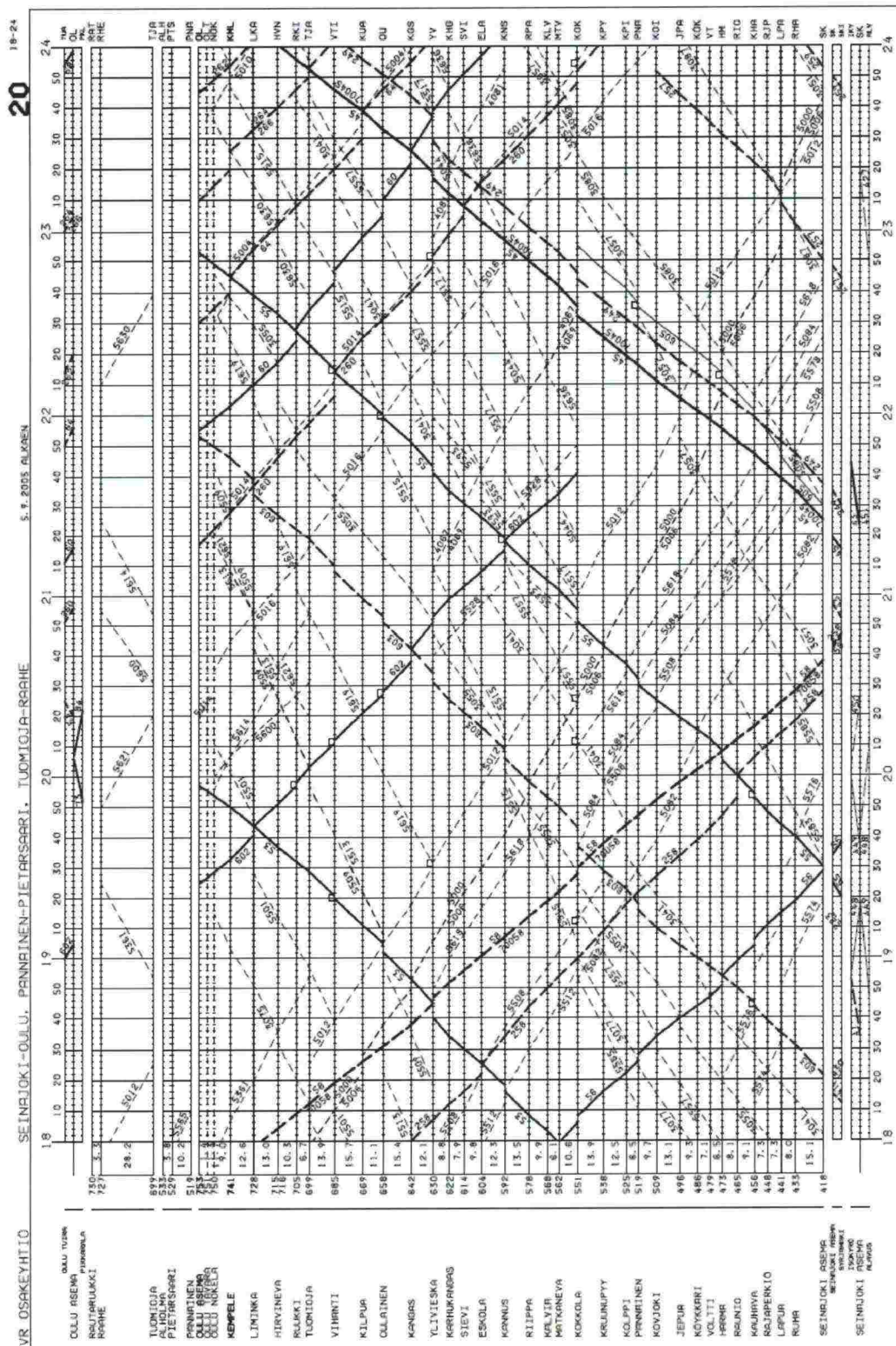
AIKATAULUPOIKKEAMISSA KÄYTETTÄVÄT SYKKOODIT

Liikenneonnettomuudet	O1	ALLEJAÄNTI (IHMINEN)	Henkilökunta	H1	HENKILÖKUNNAN VAIHTO	Rata	R1	TILAPAISET NOPEUSRAJOITUKSET
	O2	ALLEJAÄNTI (ELÄIN)		H2	HENKILÖKUNNAN ODOTUS		R2	ESTE RADALLA
	O3	TASORISTEYSONNETTOMUUS		H3	MUUT SYYT		R3	RADAN KUNNOSSAPITO- JA RAKENNUSTYÖT
	O4	MUUT ONNETTOMUUKSET JA VAURIOIT					R4	VARAUKSEEN SOVITUN AJAN YLITYS
Matkustajapalvelu	M1	MATKUSTAJAJÄRJYYS	Junankokoonpano	J1	VAUNUJEN OTTO TAI JÄTTÖ	Sähköistys		
	M2	MATKUSTAJIEN AIHEUTTAMIA HÄIRIÖITÄ		J2	VAUNUJEN TAI VAUNURYHMIEN ODOTUS		S1	JANNITEKATKO
	M3	AIKATAULUSTA POIKKEAVA PYSÄHDYS		J3	JARRUJEN KOETTELU		S2	TEKNISET VIAT
	M4	PASSI- JA TULLITARKASTUS		J4	ERIKOISKULJETUS		S3	SÄHKÖRADAN KUNNOSSAPITO- JA RAKENNUSTYÖT
Tavarapalvelu	M5	VANKIEN KUORMAUS JA PURKU	Veturit	J5	ALENNETTU SN		S4	HÄIRIÖ VALTAKUNNAN VERKOSSA
	M6	PYSÄHTYMISAJAN YLITYS		V1	VETURIN ODOTUS	Turva-, valvonta- ja viestilaitteet		
	T1	TAVARAN KUORMAUS JA PURKU		V2	VETURIVIKA JA JKV-VIKA VETURILAITTEISSA		P1	TURVALAITTEVIKA
	T2	POSTIN KUORMAUS JA PURKU		V3	VETOVOIMAN PUUTE		P2	OPASTINVIKA
Liikennetekniset syyt	T3	RAVINTOLAVAUNUN KUORMAUS	Moottorijunat ja vaurut	V4	VETURIN VAIHTO, LISÄYS TAI POISTO		P3	VAIHDEVIKA
	T4	AIKATAULUSTA POIKKEAVA PYSÄHDYS		K1	JARRUVIKA		P4	JKV-VIKA RATALAITTEISSA
	L1	YHTEYSLIIKENTEEN ODOTUS		K2	LAAKERIVIKA		P5	LINJA- TAI RATAPIHARADIOVIKA TAI PUHELINVIKA
	L2	JUNAKOHTAUS, EDELLÄ KULKEVA JUNA TAI SIVUUTUS		K3	JUNAN KATKEAMINEN		P6	GSM-R -VIKA
Liikennetekniset syyt	L3	AHTAUS RATAPIHALLA	Muut syyt	K4	KYTKENTÄ TAI IRROITUS (Sm / Dm)	Muut syyt	P7	VALVONTALAITTEVIKA TAI AIHEETON HÄLYTYS
	L4	RISTEÄVÄT KULKUTIET		K5	KALLISTUSVIKA (Sm3)		I1	SAA (SUMU, HUONO KELI TMS)
	L5	MYÖHÄSTYMINEN ULKOMAILTA		K6	LOVIPPÖRÄ		I2	LUMIESTEET
	L6	HÄIRIÖ PAIVYSTYSTYÖSSÄ		K7	MUU VIKKA		I3	ASIAATTOMAT RADALLA LIIKKUJAT TAI ILKIVALTA
Liikennetekniset syyt	L7	TULOJUNA MYÖHÄSSÄ	Etualajassakulku (vain tavaraliikenteessä)				I4	MUUT HÄIRIÖT
	L8	LIIKENTEENHOITOVIRHE		E1	TULOJUNA ETUJASSA	Etualajassakulku (vain tavaraliikenteessä)	E5	VETURIN KULKU
				E2	VAIHTOTOITA VÄHÄN TAI EI OLLLEENKAAN		E6	AJOAJAN ALITUS / LIIKENNETEKNISET SYYT
				E3	PIENI JUNAKOKO		E7	MUU SYY
				E4	KÄÄNTÖAJAN ALITUS			









LIITE 3 (1/3)

Luettelo säännöllisesti liikennöivistä tavarajunista rataosalla Seinäjoki–
Oulu (RHK 2005c)

Vakinaisten junien luettelo			Seinäjoki–Oulu							
Jjs 24.8.2005 OP			Voimassa 5.9.2005 alkaen							
Junan nro	Lähtö- paikka	Määrä- paikka	Kulkupäivät							
			ma	ti	ke	to	pe	la	su	
SEINÄJOKI–KOKKOLA										
3041	Hnk	Kem	ma			to		Sk	- Kok	18.02 - 20.11
3051	Pslt	Nok	ma	ti	ke	to		Sk	- Kok	23.46 - 01.19
3053	Pslt	Nok		ti	ke	to	pe	la	Sk	- Kok 01.13 - 02.55
3057	HI	Rhe	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Sk - Kok 20.33 - 23.10
3059	HI	Rhe	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Sk - Kok 10.00 - 12.42
3069	Vka	Nok						la	Sk	- Kok 01.39 - 03.23
3069	Vka	Tor		ti	ke	to	pe		Sk	- Kok 01.39 - 03.23
3071	Vka	Kok	ma	ti	ke	to	pe	la	Sk	- Kok 04.24 - 06.28
3083	Vka	Kok	ma	ti	ke	to	pe		Sk	- Kok 07.40 - 10.01
5571	Sk	Kok			ke			Sk	- Kok	06.46 - 09.05
5589	Sk	Kok	ma					Sk	- Kok	01.39 - 03.23
KOKKOLA–SEINÄJOKI										
5002	Rhe	Rit	ma	ti	ke	to		la	su	Kok - Sk 13.06 - 15.36
5006	Kem	Hnk		ti			pe		Kok	- Sk 20.25 - 23.43
5010	Olt	Tpet		ti	ke	to	pe	la	Kok	- Sk 02.56 - 04.56
5012	Rhe	HI	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Kok - Sk 21.00 - 23.35
5014	Kem	Pslt	ma	ti	ke	to	pe		Kok	- Sk 23.55 - 01.40
5016	Nok	Pslt	ma	ti	ke	to	pe		Kok	- Sk 23.30 - 01.15
5018	Rhe	HI	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Kok - Sk 10.44 - 12.54
5032	Kok	Tpet		ti	ke	to	pe		Kok	- Sk 12.10 - 14.36
5080	Kok	Hva	ma						Kok	- Sk 12.10 - 14.36
5084	Kok	Tpet	ma	ti	ke	to	pe		Kok	- Sk 19.37 - 22.31
5588	Kok	Sk						la	Kok	- Sk 07.15 - 08.45
5590	Kok	Sk			ke				Kok	- Sk 10.26 - 11.58

LIITE 3 (2/3)

Luettelo säännöllisesti liikennöivistä tavarajunista rataosalla Seinäjoki–
Oulu (RHK 2005c)

KOKKOLA–YLIVIESKA									
3041	Hnk	Kem	ma	to		Kok	- Yv	20.12	- 21.53
3051	Pslt	Nok	ti	ke	to pe	Kok	- Yv	01.19	- 02.15
3053	Pslt	Nok	ti	ke	to pe la	Kok	- Yv	02.57	- 03.56
3057	HI	Rhe	ma	ti	ke to pe la su	Kok	- Yv	23.28	- 01.06
3059	HI	Rhe	ma	ti	ke to pe la su	Kok	- Yv	12.42	- 13.52
3069	Vka	Nok			la	Kok	- Yv	03.24	- 04.19
3069	Vka	Tor	ti	ke	to pe	Kok	- Yv	03.24	- 04.19
5040	Kok	Ilm	ti	ke	to pe la	Kok	- Yv	00.01	- 01.34
5042	Kok	Pyk	ma	ti		Kok	- Yv	01.36	- 03.42
5044	Kok	Pyk		ke	to	Kok	- Yv	21.19	- 23.30
5044	Kok	Yv			pe	Kok	- Yv	21.19	- 23.30
5046	Kok	Ker	ma	ti	ke to pe	Kok	- Yv	05.05	- 06.29
5050	Kok	Ker			la su	Kok	- Yv	07.03	- 08.18
5501	Kok	Nok	ti	ke	to pe	Kok	- Yv	14.57	- 16.24
5511	Kok	Kem	ma	ke	pe	Kok	- Yv	07.42	- 09.40
5513	Kok	Nok	ma	ti	ke to pe la	Kok	- Yv	15.45	- 17.40
5521	Pts	Yv			la	Kok	- Yv	10.45	- 12.58
5525	Kok	Yv	ti	ke	to pe	Kok	- Yv	06.40	- 07.30
5531	Pts	Yv			la	Kok	- Yv	16.24	- 17.51
5551	Kok	Yv	ma	ti	ke to pe	Kok	- Yv	08.15	- 10.00
5593	Kok	Yv	ti			Kok	- Yv	20.50	- 21.59
YLIVIESKA–RAAHE/OULU									
3041	Hnk	Kem	ma	to		Yv	- Ol	21.53	- 01.13
3051	Pslt	Nok	ti	ke	to pe	Yv	- Nok	02.17	- 03.43
3053	Pslt	Nok	ti	ke	to pe la	Yv	- Nok	03.56	- 05.34
3057	HI	Rhe	ma	ti	ke to pe la su	Yv	- Rhe	02.48	- 04.15
3059	HI	Rhe	ma	ti	ke to pe la su	Yv	- Rhe	13.53	- 15.30
3069	Vka	Nok			la	Yv	- Nok	04.19	- 05.55
3069	Vka	Tor	ti	ke	to pe	Yv	- Nok	04.19	- 05.55
5501	Kok	Nok	ti	ke	to pe	Yv	- Nok	17.18	- 20.11
5511	Kok	Kem	ma	ke	pe	Yv	- Olt	10.40	- 14.32
5513	Kok	Nok	ma	ti	ke to pe la	Yv	- Nok	17.45	- 21.18
5527	Yv	Ol			pe	Yv	- Ol	07.05	- 08.43
5529	Yv	Ol	ti	ke	to	Yv	- Ol	10.35	- 11.47
5601	Rhe	Nok	ma	ti	ke to pe la	Rhe	- Nok	12.30	- 14.09
5619	Yv	Nok	ma	ti	ke to pe	Yv	- Nok	19.31	- 22.35
5630	Rhe	Vus	ma	ti	ke to	Rhe	- Nok	22.10	- 23.36
5630	Rhe	Nok			pe	Rhe	- Nok	22.10	- 23.36

LIITE 3 (3/3)

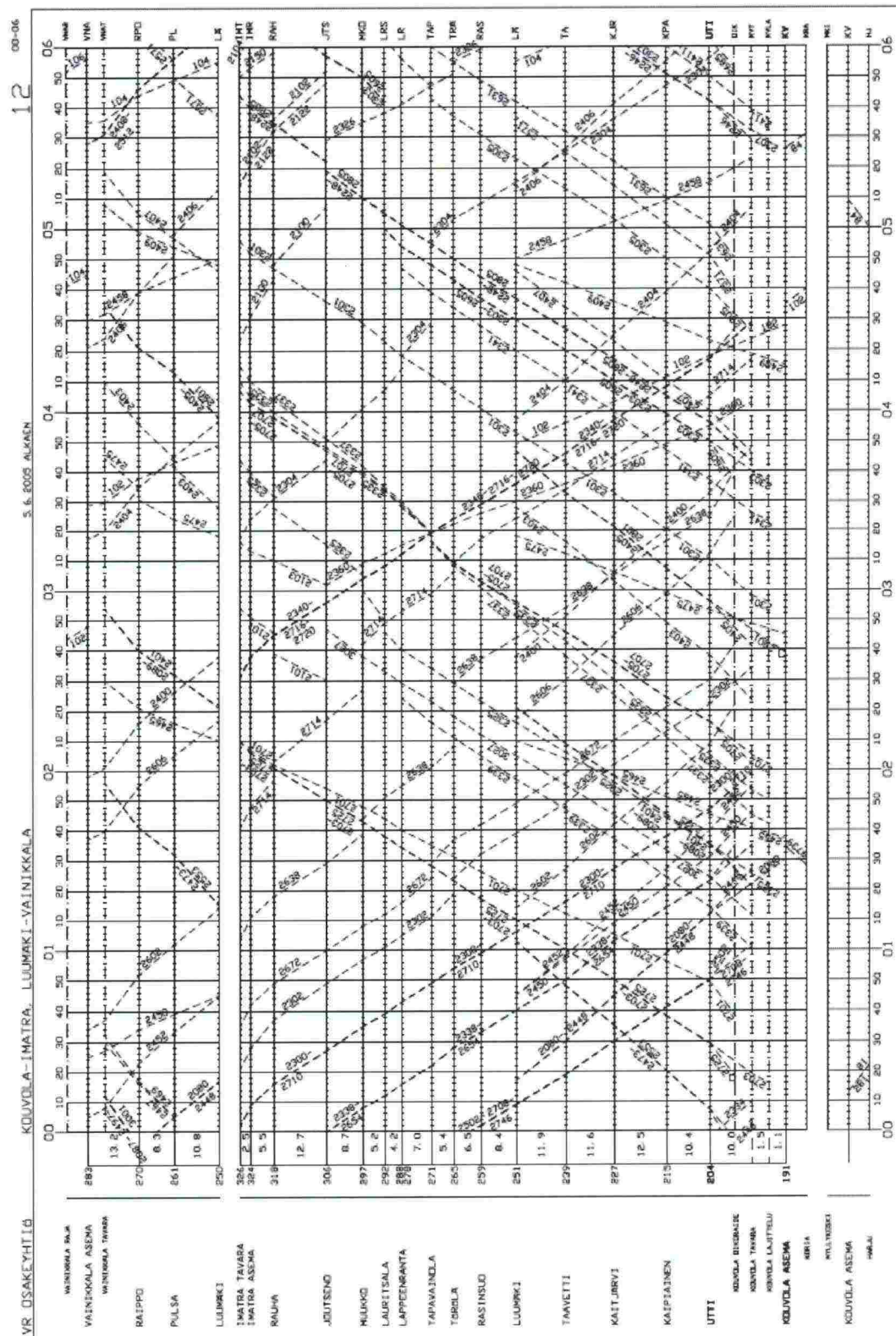
Luettelo säännöllisesti liikennöivistä tavarajunista rataosalla Seinäjoki–
Oulu (RHK 2005c)

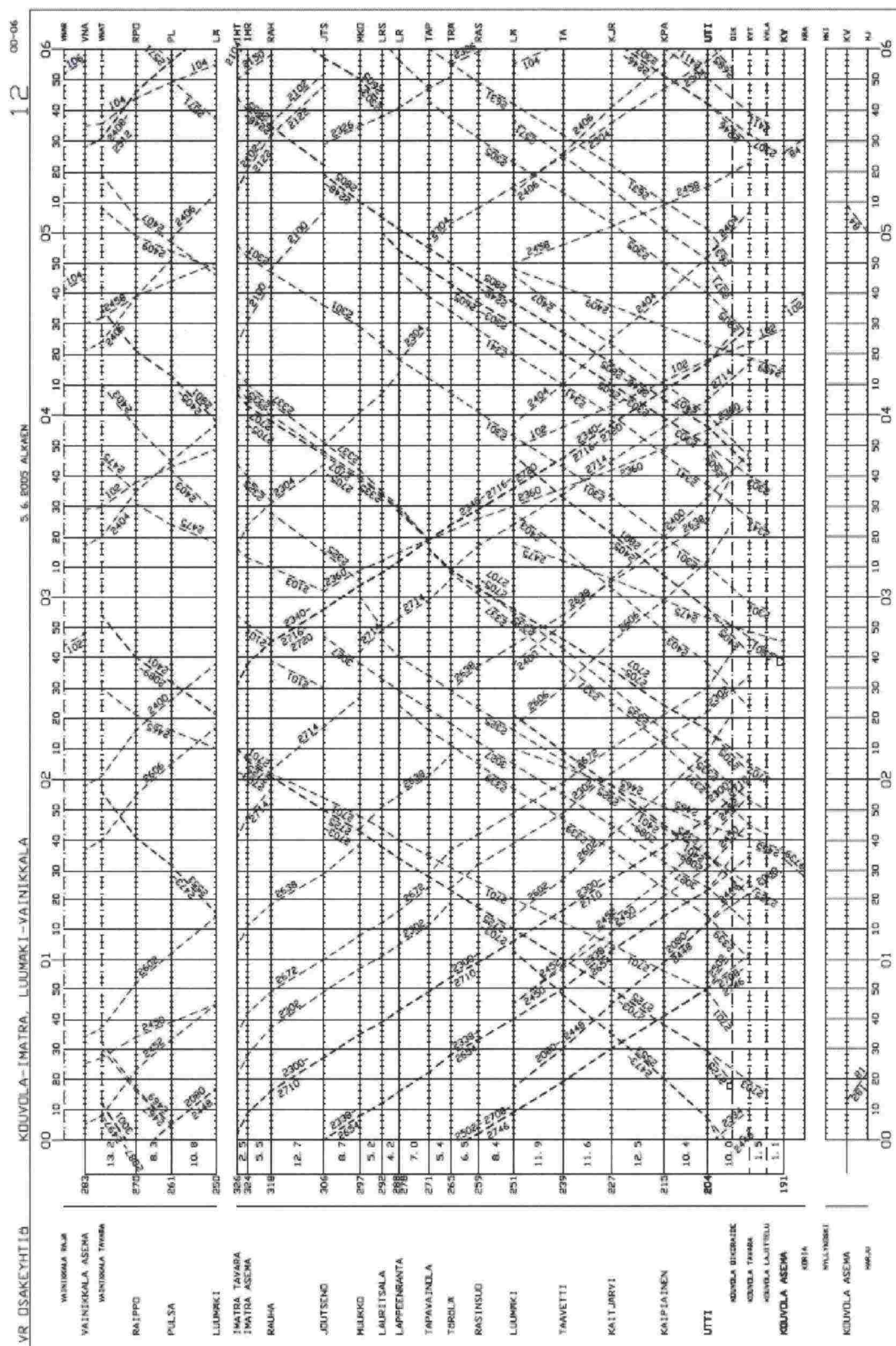
OULU/RAAHE–YLIVIESKA

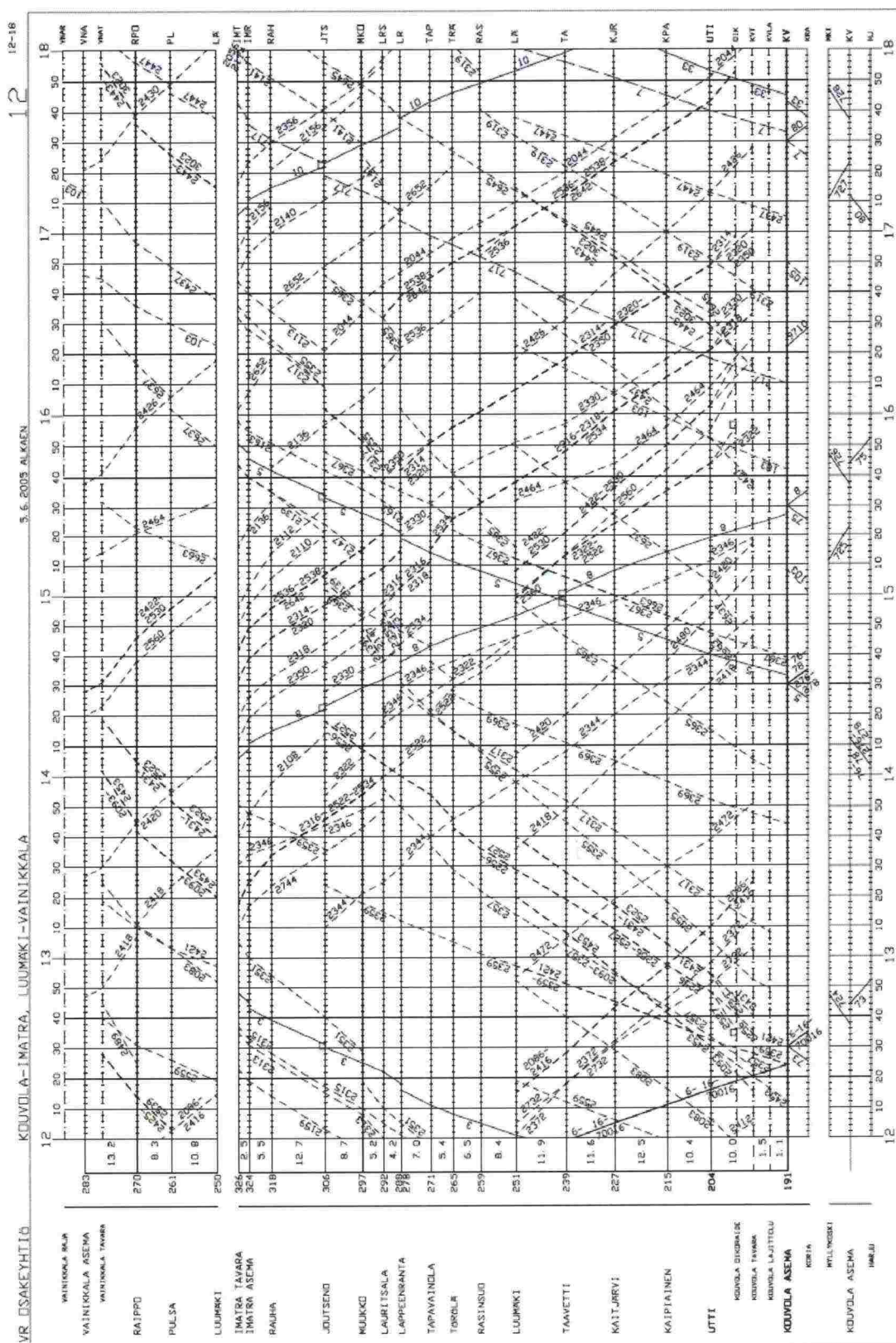
5002	Rhe	Rit	ma	ti	ke	to	la	su	Rhe	-	Yv	08.10	-	09.53	
5006	Kem	Hnk		ti		pe			Ol	-	Yv	17.11	-	19.06	
5010	Olt	Tpet	ma	ti	ke	to	pe		Olt	-	Yv	23.37	-	01.43	
5012	Rhe	HI	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Rhe	-	Yv	17.55	-	19.31
5014	Kem	PsIt	ma	ti	ke	to	pe		Olt	-	Yv	21.17	-	22.51	
5016	Nok	PsIt	ma	ti	ke	to	pe		Nok	-	Yv	20.35	-	22.20	
5018	Rhe	HI	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Rhe	-	Yv	06.55	-	08.55
5361	Vus	Rhe	ma	ti	ke	to	pe		Nok	-	Rhe	17.55	-	19.25	
5502	Nok	Kok	ma	ti	ke	to	pe	la	Nok	-	Yv	00.25	-	02.40	
5504	Olt	Kok	ma	ti	ke	to	pe		Olt	-	Yv	03.15	-	06.52	
5512	Kem	Yv		ti		to			Olt	-	Yv	11.47	-	16.48	
5602	Olt	Rhe	ma	ti	ke	to	pe	la	Olt	-	Rhe	06.20	-	07.57	
5616	Nok	Yv	ma	ti	ke	to	pe		Nok	-	Yv	07.00	-	09.15	

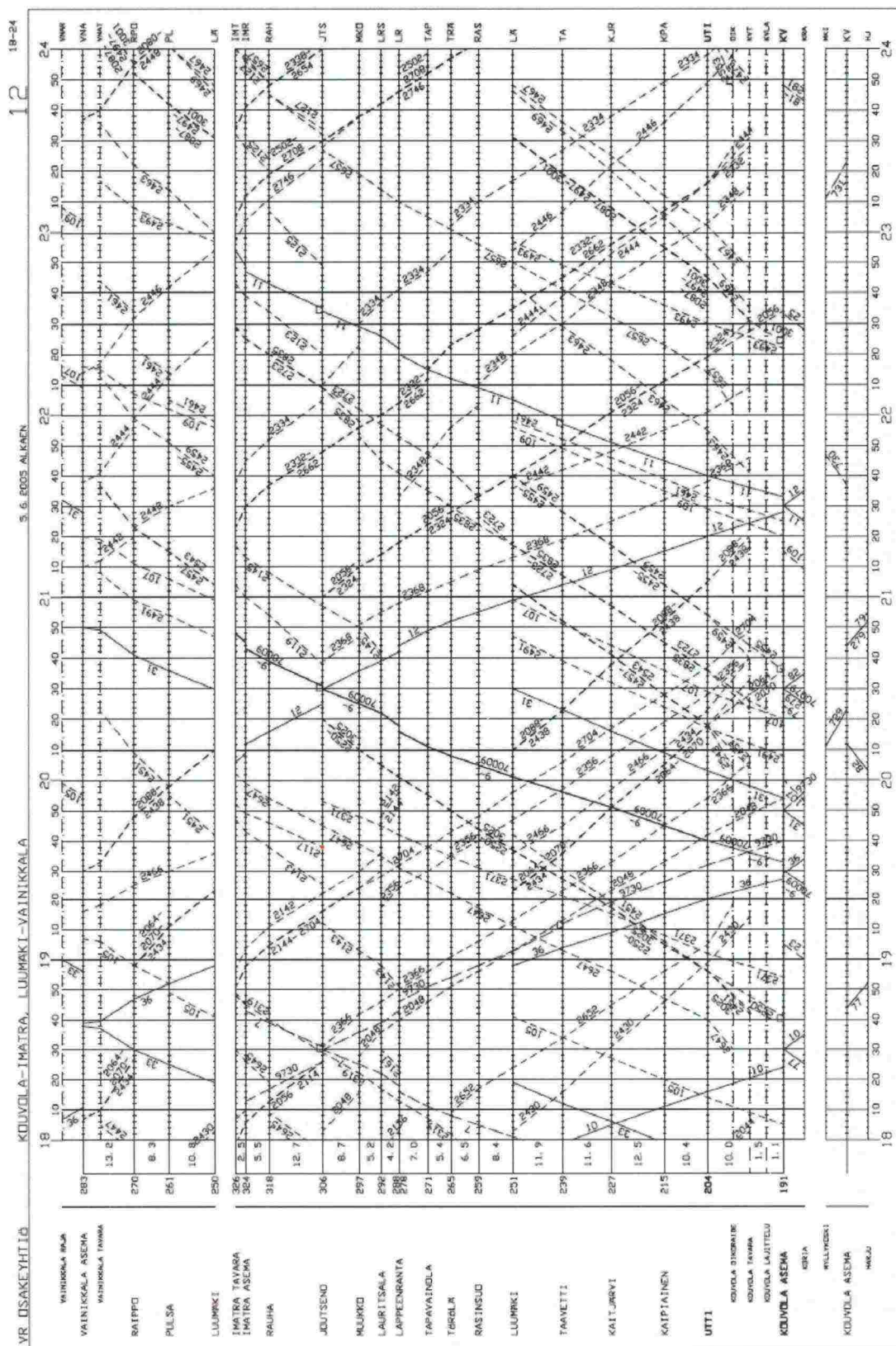
YLIVIESKA–KOKKOLA

4059	Ker	Kok	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Yv	-	Kok	00.22	-	03.18
4063	Ilm	Kok	ma							Yv	-	Kok	13.22	-	14.54
4067	Ilm	Kok			ke					Yv	-	Kok	21.09	-	22.34
4067	Yv	Kok	ma	ti		to				Yv	-	Kok	21.09	-	22.34
5002	Rhe	Rit	ma	ti	ke	to		la	su	Yv	-	Kok	11.30	-	13.04
5006	Kem	Hnk		ti		pe				Yv	-	Kok	19.06	-	20.25
5010	Olt	Tpet		ti	ke	to	pe	la		Yv	-	Kok	01.43	-	02.55
5012	Rhe	HI	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Yv	-	Kok	19.32	-	20.50
5014	Kem	PsIt	ma	ti	ke	to	pe			Yv	-	Kok	22.51	-	23.55
5016	Nok	PsIt	ma	ti	ke	to	pe			Yv	-	Kok	22.20	-	23.29
5018	Rhe	HI	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Yv	-	Kok	09.17	-	10.42
5043	Pyk	Kok	ma	ti						Yv	-	Kok	10.10	-	11.25
5045	Pyk	Kok			ke	to	pe			Yv	-	Kok	12.12	-	14.05
5502	Nok	Kok	ma	ti	ke	to	pe	la		Yv	-	Kok	02.42	-	05.02
5504	Olt	Kok	ma	ti	ke	to	pe			Yv	-	Kok	08.50	-	10.30
5528	Yv	Kok						la		Yv	-	Kok	20.40	-	21.50
5552	Yv	Kok		ti	ke	to	pe			Yv	-	Kok	11.37	-	13.10









**Luettelo säännöllisesti liikennöivistä tavarajunista rataosalla Kouvola–Imatra
(RHK 2005c)**

Vakinaisten junien luettelo			Kouvola–Imatra							
Jjs 24.8.2005 OP			Voimassa 5.9.2005 alkaen							
Junan nro	Lähtö- paikka	Määrä- paikka	Kulkupäivät							
			ma	ti	ke	to	pe	la	su	
KOUVOLA–IMATRA										
2103	Jts	Imt			ti	ke	to	pe	la	Jts - Imt 03.02 - 03.16
2109	Jts	Imt	ma		ti	ke	to	pe	la	Jts - Imt 11.24 - 11.50
2113	Jts	Imt							la su	Jts - Imt 16.21 - 16.44
2117	Jts	Imt							su	Jts - Imt 19.38 - 19.52
2119	Jts	Imt	ma		ti	ke	to	pe		Jts - Imt 20.38 - 21.04
2123	Jts	Imt							la	Jts - Imt 22.20 - 22.43
2125	Jts	Imt	ma		ti	ke	to	pe	su	Jts - Imt 22.49 - 23.32
2127	Jts	Imt							la	Jts - Imt 23.34 - 24.00
2141	Lrs	Imt							su	Lrs - Imt 17.17 - 18.00
2143	Lr	Imt	ma		ti	ke	to	pe		Lr - Imt 18.51 - 19.47
2143	Lrs	Imt							la	Lrs - Imt 18.58 - 19.47
2145	Lrs	Imt	ma		ti	ke	to	pe	la su	Lrs - Imt 20.42 - 21.17
2153	Lrs	Imt	ma							Lrs - Imt 08.43 - 09.18
2153	Lr	Imt			ti	ke	to	pe	la	Lr - Imt 08.10 - 09.18
2155	Lr	Lrs	ma							Lr - Lrs 07.58 - 08.04
2159	Lrs	Imt			ti	ke	to	pe	la	Lrs - Imt 11.48 - 12.23
2230	Pmla	Imt			ti		to	pe		Kvt - Imt 08.41 - 10.45
2250	Pmla	Jts							la	Kv - Jts 18.41 - 20.20
2301	Kvla	Imt			ti	ke	to	pe	la	Kvla - Imt 02.56 - 04.56
2303	Kvla	Imt	ma							Kvla - Imt 03.37 - 06.45
2305	Kvt	Imt	ma		ti	ke	to	pe		Kvt - Imt 04.26 - 08.38
2307	Kvla	Jts							la	Kvla - Jts 05.29 - 07.15
2313	Kvla	Imt							la su	Kvla - Imt 09.44 - 12.35
2315	Kvla	Imt	ma		ti	ke	to	pe		Kvla - Imt 10.33 - 12.37
2317	Kvla	Imt	ma		ti	ke	to	pe		Kvla - Imt 13.08 - 16.32
2319	Kvla	Imt							la	Kvla - Imt 16.38 - 18.49
2339	Kvt	Lr	ma		ti	ke	to	pe	la	Kvt - Lr 01.00 - 02.24
2359	Kv	Lrs							su	Kv - Lrs 11.38 - 12.30
2361	Kvla	Jts							su	Kvla - Jts 06.24 - 08.03
2365	Kvla	Jts	ma		ti	ke	to	pe		Kvla - Jts 14.02 - 16.46
2367	Kv	Jts	ma		ti	ke	to	pe		Kv - Jts 14.39 - 15.48
2369	Kv	Jts							la	Kv - Jts 13.44 - 15.02
2371	Kv	Jts							su	Kv - Jts 18.54 - 19.53
2379	Lrs	Imt							su	Lrs - Imt 10.21 - 10.58
2605	Ktt	Imt			ti	ke	to	pe	la	Oik - Imt 03.37 - 06.45

Luettelo säännöllisesti liikennöivistä tavarajunista rataosalla Kouvola–Imatra (RHK 2005c)

Junan nro	Lähtö- paikka	Määrä- paikka	Kulkupäivät									
			ma	ti	ke	to	pe	la	su			
KOUVOLA–IMATRA												
2631	Ktt	Imt	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Oik	-	Imt 04.50 - 07.29
2645	Ktt	Imt	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Oik	-	Imt 16.20 - 18.30
2685	Mss	Imt	ma							Oik	-	Imt 05.53 - 07.59
2685	Ktt	Imt		ti	ke	to	pe	la		Oik	-	Imt 05.53 - 07.59
2705	Kvt	Sul	ma	ti	ke	to	pe			Kvt	-	Imt 02.02 - 04.07
2723	Kvla	Sul	ma	ti	ke	to	pe			Kvla	-	Imt 20.23 - 22.29
2725	Kts	Sul			ke	to	pe			Oik	-	Imt 00.18 - 02.10
2805	Rit	Imt			ke					Kv	-	Imt 03.34 - 05.44
2835	Rit	Imt						la		Kvt	-	Imt 20.23 - 22.29
3027	Vka	Jts	ma	ti	ke	to	pe	la		Kv	-	Jts 00.59 - 02.47
IMATRA–KOUVOLA												
2038	Jts	Tpet						la		Jts	-	Kv 08.34 - 11.30
2044	Jts	Tpet						la		Jts	-	Kvt 16.21 - 18.03
2048	Jts	Tpet	ma	ti	ke	to	pe			Jts	-	Kv 18.03 - 19.54
2056	Jts	Tpet	ma	ti	ke	to	pe			Jts	-	Kv 21.00 - 22.34
2100	Imt	Jts	ma	ti	ke	to	pe	la		Imt	-	Jts 04.23 - 05.07
2102	Imt	Jts	ma	ti	ke	to	pe	la		Imt	-	Jts 05.14 - 05.52
2104	Imt	Jts							su	Imt	-	Jts 05.57 - 06.27
2108	Imt	Jts	ma	ti	ke	to	pe			Imt	-	Jts 13.40 - 14.14
2112	Imt	Jts						la	su	Imt	-	Jts 14.56 - 15.30
2114	Imt	Jts	ma	ti	ke	to	pe			Imt	-	Jts 17.59 - 18.26
2132	Imt	Lrs		ti	ke	to	pe		su	Imt	-	Lrs 08.12 - 09.02
2136	Imt	Lrs							su	Imt	-	Lrs 15.16 - 16.11
2140	Imt	Lrs	ma	ti	ke	to	pe	la		Imt	-	Lrs 16.46 - 17.24
2142	Imt	Lrs	ma	ti	ke	to	pe			Imt	-	Lrs 18.57 - 19.36
2142	Imt	Jts							su	Imt	-	Jts 18.57 - 19.22
2144	Imt	Lrs						la	su	Imt	-	Lrs 18.51 - 19.30
2156	Imt	Lr	ma	ti	ke	to	pe			Imt	-	Lr 16.54 - 18.03
2300	Imt	Kvt	ma							Imt	-	Kvt 00.02 - 01.59
2306	Imt	Lr	ma							Imt	-	Lr 06.55 - 07.41
2306	Imt	Kvt		ti	ke	to	pe	la		Imt	-	Kvt 06.55 - 10.16
2316	Imt	Kvt						la		Imt	-	Kvt 13.18 - 16.33
2316	Lrs	Kvt							su	Lrs	-	Kvt 14.56 - 16.33
2318	Imt	Kvt	ma	ti	ke	to	pe			Imt	-	Kvt 14.19 - 16.33
2324	Jts	Pmt							su	Jts	-	Kv 21.00 - 22.42

**Luettelo säännöllisesti liikennöivistä tavarajunista rataosalla Kouvola–Imatra
(RHK 2005c)**

			Kulkupäivät									
Junan nro	Lähtö-paikka	Määrä-paikka	ma	ti	ke	to	pe	la	su			
IMATRA-KOUVOLA												
2332	Imt	Kvt						la		Imt	- Kvt	21.23 - 23.28
2338	Imt	Kvt	ma	ti	ke	to	pe			Imt	- Kvt	23.34 - 01.35
2344	Lr	Kvt						la		Lr	- Kvt	13.30 - 14.53
2348	Lr	Kvt	ma	ti	ke	to	pe			Lr	- Kvt	21.33 - 23.15
2350	Imt	Kvt							su	Imt	- Kvt	14.12 - 17.01
2352	Lrs	Kvt	ma	ti	ke	to	pe			Lrs	- Kvt	10.05 - 11.27
2356	Lrs	Kvt	ma	ti	ke	to	pe			Lrs	- Kvt	19.17 - 20.40
2360	Jts	Kvt	ma							Jts	- Kvt	03.02 - 04.03
2362	Jts	Kvt							su	Jts	- Kvt	09.52 - 11.27
2366	Jts	Kvt	ma	ti	ke	to	pe			Jts	- Kvt	18.31 - 20.06
2368	Jts	Kvt						la		Jts	- Kvt	20.39 - 21.46
2372	Imt	Lrs		ti	ke	to	pe	la		Imt	- Lrs	09.53 - 10.37
2502	Imt	Hma		ti						Imt	- Oik	23.05 - 01.02
2638	Imt	Mss		ti	ke	to	pe	la		Imt	- Oik	01.04 - 03.41
2652	Imt	Mss	ma	ti	ke	to	pe	la	su	Imt	- Oik	16.02 - 19.18
2654	Imt	Mss						la	su	Imt	- Oik	23.34 - 01.35
2672	Imt	Kts	ma		ke					Imt	- Kv	23.44 - 01.41
2704	Sul	Kvt	ma	ti	ke	to	pe			Imt	- Kv	18.51 - 20.49
2708	Sul	Kvt							su	Imt	- Kvt	23.05 - 01.02
2710	Uim	Kvt		ti	ke	to	pe	la		Imt	- Kvt	00.02 - 01.59
2712	Sul	Lrs	ma							Imt	- Lrs	06.18 - 06.57
2716	Sul	lkr					pe			Imt	- Oik	02.31 - 04.27
2730	Sul	Lr		ti	ke	to	pe	la		Imt	- Lr	06.18 - 07.10
2746	Sul	Jts						la		Imt	- Jts	22.57 - 23.24

RATAHALLINTOKESKUKSEN JULKAISUJA A-SARJASSA

- 1/2002 Ratarakenteen routasuojaus
- 3/2002 Rautatietasoristeysten turvaamis- ja poistostrategia 2020
- 4/2002 Rautateiden maanvaraiset pylväasperustukset, lisensiaatintutkimus
- 5/2002 Raiteentarkastus ja siinä ilmenevien virheiden analysointi välillä Kirkkonummi–Turku
- 6/2002 Kerava–Lahti-oikoradan sosiaalisten vaikutusten arviointi
- 7/2002 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2025
- 8/2002 Puomillisten tasoristeysten turvallisuus
- 9/2002 Vartioimattomien tasoristeysten turvallisuus
- 10/2002 Ratarumpututkimus, mallinnus
- 1/2003 Katsaus Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoimintaan
- 2/2003 Instrumentation and Modelling of Railway Culverts
- 3/2003 Rautatieliikenteen onnettomuuksien ja vaaratilanteiden raportoinnin kehittäminen
- 4/2003 Henkilöliikenneasemien esteettömyyskartoituksen tuloksia
- 1/2004 Tavaraliikenteen ratapihavisio ja -strategia 2025
- 2/2004 Rautateiden kaukoliikenteen asemien palvelutaso ja kehittämistarpeet
- 3/2004 Rautatieinfrastruktuurin elinkaarikustannukset
- 4/2004 Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa
- 5/2004 Radan kulumisen rajakustannukset vuosina 1997 – 2002
- 6/2004 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997 – 2002
- 7/2004 Ratakapasiteetin jakamisen vaatimukset ja liikenteen suunnittelun tila
- 8/2004 Stabiilitaiteen kriittiset ratapenkereet, esitutkimus
- 9/2004 Ratapenkereitten leveys ja luiskakaltevuus, esitutkimus
- 10/2004 Lähtökohtia ratapihojen kapasiteetin mittaamiseen
- 1/2005 Sähköratamaadoitusten perusteet – suojarakenteet, rakennukset ja laiturirakenteet
- 2/2005 Kerava–Lahti-oikoradan ennen-jälkeen vaikutusarviointi, ennen-vaiheen selvitys
- 3/2005 Ratatietojen kuvaaminen – ratatietokanta ja verkkoselostus
- 4/2005 Kaakkois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
- 1/2006 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämisstrategia
- 2/2006 Rautatie ja sen vaarat osana lasten ympäristöä
- 3/2006 Matkustajainformaatiojärjestelmien arviointi Tampereen, Toijalan ja Hämeenlinnan rautatieasemilla



**RATAHALLINTOKESKUS
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN**

Julkaisija:
Ratahallintokeskus
Keskuskatu 8, PL 185, 00101 Helsinki
puh. 02 0751 5111, fax 02 0751 5108
www.rhk.fi

ISBN 952-445-145-x (nid.)
ISBN 952-445-146-8 (pdf)
ISSN 1455-2604